

Qualifizierung sicherheitsrelevanter satellitenbasierter Ortungssysteme für den Bodenverkehr

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. (FH) Dirk Spiegel M. Sc., M. Sc.
aus: Buxtehude

eingereicht am: 26.09.2017
mündliche Prüfung am: 24.11.2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer

Meine Vorliebe für klare Strukturen resultiert aus dem Wunsch oder vielleicht auch aus der Illusion,
auf diese Weise die Übersicht zu behalten und die Welt in den Griff zu bekommen

Andreas Gursky

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Die lange Tradition des Instituts in der satellitenbasierten Ortung für sicherheitsrelevante Anwendungen diente mir als Grundlage. Ich bedanke mich bei allen, die mich innerhalb und außerhalb des Instituts bei der Erstellung meiner Dissertation fachlich, menschlich sowie moralisch unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder, dem ehemaligen Leiter des Instituts. Mit vielen fruchtbaren Ideen und Diskussionen hat er die vorliegende Arbeit maßgeblich beeinflusst.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie die wertvollen fachlichen Hinweise während der Promotionszeit und im Vorgespräch zur mündlichen Doktorprüfung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer danke ich für seine freundliche Bereitschaft, den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen.

Meinen ehemaligen Zimmerkollegen Felix Reinbold, René Hosse, Tamás Kurczveil, Arne Geffert und Marco Wegener und allen weiteren Arbeitskollegen, insbesondere Andreas Dodinoiu und Jan Welte, danke ich für das angenehme Arbeitsklima die vielen wissenschaftlichen und unwissenschaftlichen Diskussionen; vielen Dank, Debiao Lu, für den fachlichen und interessanten interkulturellen Austausch. Meinen studentischen Hilfskräften danke ich für unzähligen Runden auf Kolossos und die immer tatkräftige Unterstützung.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und Geschwistern, die mir all die Jahre stets den notwendigen Halt gegeben haben und mich zu dem geformt haben, was ich heute bin. Größter Dank gilt meiner Frau Johanna, die mich während der Erstellung meiner Dissertation motiviert und angetrieben hat und mir immer die Zuversicht gegeben hat, sie erfolgreich abzuschließen.

Dirk Spiegel

Hamburg, im Dezember 2017

Kurzfassung

Für zukünftige Fahrerassistenzsysteme bis zum autonomen Fahren ist das Wissen über den genauen Ort des Fahrzeuges von existenzieller Bedeutung. Eine herausragende Möglichkeit der Ortung ermöglichen satellitenbasierte Ortungssysteme. Damit diese für sicherheitsrelevante Anwendungen eingesetzt werden können, müssen sie durch ein DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflabor qualifiziert und gegen die Anforderungen aus den Anwendungen zertifiziert werden. Bis heute ist dies für den Bodenverkehr nicht möglich, da die Anforderungen in der Norm hinsichtlich der präzisen und eindeutigen Definition der Qualitätsmerkmale, der Dokumentation der Messbedingungen während der Qualifizierung und der Eindeutigkeit von Messergebnissen, bedingt durch das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern, nicht erfüllt werden.

Diese Hemmnisse werden in dieser Arbeit beseitigt, angefangen mit der eindeutigen Definition von Qualitätsmerkmalen bei der Qualifizierung von GNSS-Empfängern. Da die der Stichprobe zugrunde liegende Verteilung begrenzt durch zeitliche und örtliche Effekte nicht repräsentativ ist, wird hierbei sowohl auf die parametrische Beschreibung als auch die nicht parametrische Beschreibung eingegangen. Um das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern zu quantifizieren, wird in dieser Arbeit ein Qualitätsmaß eingeführt, welches keine durch Parameter beschreibbare Stichprobenverteilung benötigt.

Damit die Messbedingungen dokumentiert werden können und um zu verstehen, unter welchen Bedingungen die Messungen durchgeführt wurden, wird in dieser Arbeit ein neues Maß – der bestmögliche Ort – eingeführt, welcher die Messbedingungen in einer Größe verdichtet. Die Messbedingungen werden dabei durch Referenzmessungen bestimmt. Diese streuen und folglich wird der bestmögliche Ort um eine Messunsicherheit nach dem Verfahren des GUM erweitert. Um den bestmöglichen Ort zu bestimmen, wurde das Programm – CONCAL – entwickelt und verifiziert.

Nach der Überwindung der Hemmnisse wird in dieser Arbeit eine beispielhafte normenkonforme Qualifizierung eines GNSS-Empfängers durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüffahrten zeigen, dass die Herstellerangaben bezüglich der Ortsgenauigkeit für die Prüffahrt nicht eingehalten werden konnten. Werden jedoch die systematischen Abweichungen durch die Messbedingungen berücksichtigt, lässt sich zeigen, dass die Genauigkeitsangaben eingehalten werden. Damit wird durch diese Arbeit eine negative Bewertung des Prüfgegenstands vermieden.

Abstract

The information about the vehicles' location is critical for future advanced driver assistance systems and autonomous vehicles. An excellent way to locate is by means of satellite-based positioning systems. To be used for safety-relevant applications, these must be qualified by a DIN EN ISO / IEC 17025 accredited test laboratory and certified against the requirements of the applications. Hitherto, this is not possible for ground transport, because the requirements in the standard are not considered with regard to the precise and clear definition of key performance indicators, the documentation of measurement conditions during the qualification and the unambiguous measurement results due to the stochastic behaviour of GNSS receivers.

These drawbacks are eliminated in this work, beginning with the clear definition of key performance parameters of GNSS-receivers. Since the sample distributions of measurement campaigns are not representative due to temporal and local effects for short test drives, both the parametric description and the distribution independent description are discussed. To quantify the stochastic behaviour of GNSS-receivers, a new quantity is introduced, which does not require samples following a distribution that can be described by parameters.

To be able to document the measurement conditions and to understand under which conditions the measurements have been carried out, a new measure - the best possible location (german: bestmöglicher Ort)- is introduced in this work. Within the measure all measuring conditions are densified. The measuring conditions are determined by reference measurements of the individual measurement condition effects. The accuracy of the reference measurements varies and consequently the best possible location is expanded by a measurement uncertainty according to the procedure of the GUM.

After the drawbacks are overcome, an exemplary standard-conform qualification of a GNSS receiver is carried out in this work. The results of the test runs show that the manufacturer's data concerning the location accuracy for the test drive could not be met. If, however, the systematic deviations due to the measurement conditions are considered, it can be shown that the accuracy evaluated is compliant with the manufacturer's statements. Due to this work a negative assessment of the system under test can be avoided.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	V
KURZFASSUNG.....	VII
ABSTRACT	IX
INHALTSVERZEICHNIS.....	XI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XVII
FORMELZEICHEN.....	XIX
INDIZES	XXIII
1 EINLEITUNG	1
1.1 EINORDNUNG DER ARBEIT	3
1.2 PROBLEMSTELLUNG	5
1.2.1 Unpräzise Definition der Qualitätsmerkmale	5
1.2.2 Instationäre Messbedingungen	6
1.2.3 Ausgeprägtes stochastisches Systemverhalten.....	8
1.3 ZIELSETZUNG UND VORGEHEN	10
1.3.1 Teilziel 1: Definition der Qualitätsmerkmale	11
1.3.2 Teilziel 2: Einführung eines Maßes zur Beschreibung der Messbedingungen	12
1.3.3 Teilziel 3: Charakterisierung des stochastischen Verhaltens	12
2 DEFINITION RELEVANTER FACHBEGRIFFE	14
2.1 METROLOGISCHE FACHBEGRIFFE	14
2.2 MESSUNSICHERHEIT.....	15
2.3 KLASSIFIZIERUNG DER MESSBEDINGUNGEN WÄHREND EINER QUALIFIZIERUNG.....	16
2.4 DEFINITION DER MESSABWEICHUNGEN.....	17
2.5 TRAJEKTORIEN WÄHREND DES PRÜFPROZESSES	19
2.6 WIEDERHOLUNG VON MESSUNGEN UND DEREN QUANTIFIZIERUNG.....	20
2.6.1 Wiederholbarkeit.....	20
2.6.2 Reproduzierbarkeit	20
2.6.3 Vergleichbarkeit.....	21
2.6.4 Vergleich der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit.....	21
2.7 RELEVANTE FACHBEGRIFFE AUS DER SATELLITENORTUNG.....	21
3 THEORIE DER SCHÄTZUNG DER EIGENORTUNG.....	23

3.1	SCHÄTZUNG DES ORTS	23
3.2	SCHÄTZUNG DER ORTSABWEICHUNG	26
3.3	EINFLÜSSE AUF DAS MESSERGEBNIS UND DEREN QUANTIFIZIERUNG	27
3.4	EINFLUSS DER EPHEMERIDENABWEICHUNG	28
3.5	EINFLUSS DER SATELLITENUHRENABWEICHUNG	30
3.6	EINFLUSS DER IONOSPHERE	31
3.6.1	<i>Quantifizierung der ionosphärischen Laufzeitverlängerung</i>	32
3.6.2	<i>Messunsicherheit</i>	33
3.7	EINFLUSS DER TROPOSPHERE	34
3.7.1	<i>Mappingfunktionen</i>	35
3.7.2	<i>Standardatmosphärenparameter</i>	36
3.7.3	<i>Unsicherheit</i>	37
3.8	SIGNALABSCHATTUNG	38
3.9	MEHRWEGEAUSBREITUNG	38
3.10	VARIANZ BEI DER MESSUNG VON SATELLITENBASIERTEN ORTUNGSSYSTEMEN	39
3.10.1	<i>Empfängerrauschen und Auflösung</i>	40
3.10.2	<i>Empfängeruhrenabweichung</i>	41
3.10.3	<i>Vergangene Werte als Grundlage für die zukünftige Berechnung</i>	41
3.10.4	<i>Möglichkeiten des Umgangs mit stochastischem Verhalten</i>	41
3.11	MESSUNSIKERHEIT BEI DER BESTIMMUNG DER EINFLUSSGRÖßEN	42
4	METROLOGISCHE ANFORDERUNGEN AN DIE NORMKONFORME	
	SICHERHEITSRELEVANTE PRÜFUNG	44
4.1	ZIELE DER DIN EN ISO/IEC 17025	44
4.2	TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AUS DER DIN EN ISO/IEC 17025	45
4.2.1	<i>Probennahmeplan</i>	46
4.2.2	<i>Datenbereinigung und Auswerteverfahren</i>	47
4.2.3	<i>Messbedingungen und Räumlichkeiten</i>	47
4.2.4	<i>Messtechnische Rückführung</i>	48
4.2.5	<i>Betrachtung der Messunsicherheit</i>	49
4.3	VERGLEICH DER NORMATIVEN ANFORDERUNGEN MIT EXISTIERENDEN STANDARDS UND NORMEN	50
4.3.1	<i>DIN EN 61108 – Maritime Navigation and Radiocommunication</i>	50
4.3.2	<i>DIN EN 16803-1 - Anwendung von GNSS-basierter Ortung für Intelligente Transportsysteme</i>	51
4.3.3	<i>ETSI TR 101593 – GNSS based location systems – Minimum Performances and Features</i>	

4.3.4	<i>ION STD 101 - Recommended Test Procedures for GPS Receivers</i>	52
4.3.5	<i>ISO 17123-8(E) – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments - Part 8: GNSS Field Measurement Systems in Real-Time Kinematic (RTK)</i>	52
4.3.6	<i>JRC 51300 – Area Measurement Validation Scheme</i>	53
4.3.7	<i>RTCA DO-229 – MOPS for GPS/WAAS Airborne Equipment</i>	54
4.3.8	<i>Weitere Literatur</i>	54
4.4	BEWERTUNG DER PRÜFPROZEDUREN UND HILFSMITTEL	55
5	QUALITÄTSMERKMALE ZUR QUANTIFIZIERUNG DER MESSQUALITÄT	
	SATELLITENBASIERTER ORTUNGSSYSTEME	57
5.1	VERTEILUNG VON ANFORDERUNGEN UND STICHPROBEN	59
5.2	ELIMINIERUNG VON AUSREISSERN	62
5.3	STARTWERT UND ENDWERT EINER MESSREIHE	62
5.4	MAßGEBLICHE QUALITÄTSMÄßE ZUR BESCHREIBUNG DER ORTUNGSQUALITÄT	64
5.4.1	<i>Ortsgenauigkeit mit Beschreibung der parametrischen Statistik</i>	64
5.4.2	<i>Ortsgenauigkeit mit Beschreibung der nicht-parametrischen Statistik</i>	68
5.4.3	<i>Quantifizierung der Merkmale Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit</i>	69
5.4.4	<i>Ortsintegrität (engl. Integrity)</i>	72
5.4.5	<i>Überlebensfähigkeit (engl. Continuity)</i>	79
5.4.6	<i>Ortsverfügbarkeit (engl. Availability)</i>	80
5.5	WEITERE QUALITÄTSMÄßE ZUR QUALIFIZIERUNG VON ORTUNGSSYSTEMEN	82
5.5.1	<i>Ortsakquisitionszeit</i>	82
5.5.2	<i>Ortungslatenz</i>	82
5.5.3	<i>Ortsgenauigkeit unter Berücksichtigung der Ortungslatenzverzerrung</i>	83
5.6	DARSTELLUNG DER QUALITÄTSMERKMALE IN ATTRIBUTHIERARCHIEFORM	84
6	EINFÜHRUNG UND MODELLIERUNG EINES MERKMALS ZUR	
	QUANTIFIZIERUNG DER MESSBEDINGUNG	87
6.1	DEFINITION DES BESTMÖGLICHEN ORTS	87
6.2	KOPPLUNG BMO UND EMPFÄNGERKONFIGURATION	91
6.3	MODELLIERUNG DER MESSBEDINGUNG UND SCHÄTZUNG DES BESTMÖGLICHEN ORTS	92
6.3.1	<i>Modellierung der für den Empfänger messbaren geometrischen Empfängerantennen-Satellitenantennen Distanz</i>	94
6.3.2	<i>Bestimmung der geometrischen Distanz</i>	95
6.3.3	<i>Bestimmung der Korrekturwertabweichungen</i>	95
6.3.4	<i>Berechnung des vorläufigen bestmöglichen Orts</i>	99

6.4	BERECHNUNG DER MESSUNGSICHERHEIT DES BESTMÖGLICHEN ORTS MITTELS MONTE-CARLO-SIMULATION	99
6.5	DARSTELLUNG DES VOLLSTÄNDIGEN MESSERGEBNISSES.....	105
6.6	ERKENNTNISSE AUS DER BETRACHTUNG DER BESTMÖGLICHEN ORTE	106
6.6.1	<i>Vergleich von Messungen</i>	106
6.6.2	<i>Aussagekraft des bestmöglichen Orts im Kontext der Verifizierung der Anforderungen einer Anwendung</i>	107
7	ENTWURF UND REALISIERUNG EINER TOOLBOX ZUR BERECHNUNG DES BESTMÖGLICHEN ORTS	111
7.1	ANFORDERUNGEN AN CONCAL	111
7.2	EINGANGSGRÖßEN IN CONCAL	111
7.3	FUNKTIONSWEISE VON CONCAL.....	112
7.4	VERIFIZIERUNG VON CONCAL	115
7.4.1	<i>Verifikation über die Anzahl der sichtbaren Satelliten, Azimut und Elevation</i>	115
7.4.2	<i>Verifikation der Korrekturdaten</i>	115
7.4.3	<i>Verifikation der Orbitabweichungen</i>	115
7.4.4	<i>Verifikation der Troposphärenabweichung</i>	116
7.4.5	<i>Verifikation der Ionosphärenabweichung</i>	117
7.4.6	<i>Verifikation der Implementierung der Ortsberechnung</i>	118
7.5	AUSWERTUNG DES BESTMÖGLICHEN ORTS	118
7.6	BESTIMMUNG DER MESSUNGSICHERHEIT FÜR DIE BESTMÖGLICHE ORTSSCHÄTZUNG	119
8	NORMKONFORME ERMITTLUNG DER MESSQUALITÄT EINES AUTOMOTIVE-EMPFÄNGERS	121
8.1	PRÜFSYSTEM	121
8.1.1	<i>Prüfträger</i>	121
8.1.2	<i>Referenzmesssystem</i>	121
8.1.3	<i>Transientenrekorder</i>	124
8.1.4	<i>Prüfgegenstand</i>	125
8.1.5	<i>Anforderungen an Software</i>	125
8.2	WAHL DER PRÜFTRAJEKTORIE.....	126
8.3	AUSWERTUNG DER QUALITÄTSMERKMALE.....	128
8.3.1	<i>Auswertung Ortsgenauigkeit</i>	128
8.3.2	<i>Auswertung der Vergleichsfahrten</i>	130
8.3.3	<i>Auswertung der Wiederholgenauigkeit</i>	134
8.3.4	<i>Auswertung der Integrität</i>	139

8.3.5	<i>Auswertung der Überlebensfähigkeit.....</i>	141
8.3.6	<i>Auswertung der Verfügbarkeit.....</i>	142
8.3.7	<i>Auswertung der Ortungslatenz.....</i>	143
8.3.8	<i>Auswertung der Ortsgenauigkeit unter Berücksichtigung der Ortungslatenzverzerrung.....</i>	144
8.4	QUANTIFIZIERUNG DER MESSBEDINGUNGEN	145
8.4.1	<i>Messbedingungen während der Prüffahrt.....</i>	145
8.4.2	<i>Messunsicherheit bei der Bestimmung des bestmöglichen Orts</i>	149
8.5	VERHALTEN DER HORIZONTALEN GENAUIGKEIT DER VERGLEICHS- UND WIEDERHOLFAHRTEN	151
8.6	KORRELATION DER WIEDERHOLMESSUNGEN MIT DER REALEN MESSFAHRT	153
8.7	FAZIT UND DARSTELLUNG DES VOLLSTÄNDIGEN MESSRESULTATS	154
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	157
9.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	157
9.2	AUSBLICK.....	158
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	160
	TABELLENVERZEICHNIS	163
	LITERATURVERZEICHNIS	164
	ANHANG 1 – ORTSABWEICHUNGEN DER VERGLEICHSAHRTEN IN WEITEREN KOORDINATENSYSTEMEN	179
	NORD- UND OSTORTSPRÄZISION	179
	QUER- UND LÄNGSORTSPRÄZISION.....	182
	ANHANG 2 – ORTSABWEICHUNGEN DER WIEDERHOLFAHRTEN.....	185
	QUER- UND LÄNGSORTSPRÄZISION.....	185

Abkürzungsverzeichnis

ASIL	Automotive Safety Integrity Level
CEP	Circular Error Probable – Streukreisradius
DAkKS	Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOP	Dilution of Precision
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EN	Europäische Norm
GBAS	Ground Based Augmentation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUM	Guide to the Expression of Measurement Uncertainty
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HPL	Horizontal Protection Limit
ICAO	International Civil Aviation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
IGS	International GNSS Service
INS	Integrated Navigation System
ION	The Institute of Navigation
IPP	Ionospheric Pierce Point
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transport Systems
LOS	Line of Sight
MT	Message Type
NLOS	Non Line of Sight
NMEA	National Marine Electronics Association
PVT	Position Velocity Time
RNP	Required Navigation Parameter
SBAS	Space Based Augmentation System
SID	Sidereal Day
SIL	Safety Integrity Level - Sicherheitsanforderungsstufe
UERE	User Equivalent Ranging Error
VIM	„Vocabulaire international de métrologie“ – Internationales Wörterbuch der Metrologie
VTEC	Vertical Total Electron Content
WGS84	World Geodetic System 1984

Formelzeichen

A	Verfügbarkeit	
AG	Alarmgrenze	
a	Hilfsvariabel	
a	Parameter aus Navigationsnachricht	
a_1	empirische Konstante	77,624 K/mbar
a_2	empirische Konstante	-12,92 K/mbar
a_3	empirische Konstante	371,9 K ² /mbar
$\alpha_{f0}, \alpha_{f1}, \alpha_{f2}$	Uhrenoffset, -drift, -beschleunigung	
α^-, α^+	Untere und obere Überdeckungsintervallgrenze	
b	Hilfsvariabel	
β_0	Temperaturänderungsrate	
C	Überlebensfähigkeit	
c	Lichtgeschwindigkeit	299792458 m/s
e	partielle Luftfeuchtigkeit	
ε	Abweichungsvektor	
F	systematischer Abweichungsvektor des bestmöglichen Orts	
f	Frequenz	
\bar{f}	besten Schätzwert der Messbedingungen	
γ	Kompressibilität	
K	Anzahl der Messwerte / Simulationsschritte	
k	Erweiterungsfaktor	
k_1 bis k_4	globalgültige Konstanten	
k_p	Erweiterungsfaktor der Wahrscheinlichkeit p	
λ_0	Wasserdampfänderungsrate	
$\Delta\beta$	saisonale Änderung der Temperaturänderungsrate	
Δd_{ion}	Korrekturwertabweichung in der Ionosphäre	
Δd_{orb}	Korrekturwertabweichung im Orbit	
Δd_{trop}	Korrekturwertabweichung in der Troposphäre	
Δdt_s	Korrekturwertabweichung der Uhren	
Δe	saisonale Änderung der Luftfeuchte	
$\Delta\epsilon$	Korrekturwertabweichungen (nicht korrigierte systematische Abweichung)	
ΔP	saisonale Druckänderung	

ΔT	saisonale Temperaturänderung
Δt	Satellitenlaufzeit
$\Delta \rho$	Näherungsvektor der Pseudodistanzen
$\Delta \delta t$	inkrementelle Komponente der Uhrenabweichung
$\Delta x,$	inkrementelle Komponenten in x im ECEF Koordinatensystem
$\Delta \hat{x}$	Näherungsvektor der inkrementellen Komponenten
Δy	inkrementelle Komponenten in y im ECEF Koordinatensystem
	Messabweichung
Δz	inkrementelle Komponenten in z im ECEF Koordinatensystem
δt	Laufzeitverzögerung durch Uhrenabweichung
$\delta \ddot{t}$	Näherungswert der Laufzeitverzögerung durch Uhrenabweichung
δd_{ion}	Ionosphärenabweichungen
δd_{mp}	Mehrwegeabweichungen
δd_{orb}	Orbitabweichungen
δd_{trop}	Troposphärenabweichungen
$\delta \rho$	Korrekturwert der Pseudodistanz
δx	Korrekturwert in x in ECEF
δy	Korrekturwert in y in ECEF
δz	Korrekturwert in z in ECEF
ε	Messabweichungsvektor
G	Verteilungsdichtefunktion
H	Geometriematrix
I	Integrität
	Ionosphärische Laufzeitverlängerung
i	Messreihe
j	Merkmal
h	Höhe der Sphärenschicht
M	Anzahl der Ausgangsgrößen
m	Mappingfaktor
	Manöver
N	Brechungsindex
n	Anzahl der Messwerte
P	Überdeckungswahrscheinlichkeit in %
PG	Protektionsgrenze
p	Partialdruck
	Überdeckungswahrscheinlichkeit

R	Anzahl der Eingangsgrößen
r	geometrische Distanz zwischen Satelliten- und Nutzerantenne
ρ	Pseudodistanz
s	Distanzvektor Satellit – Koordinatenursprung
s	Ortspräzision/ Standardabweichung
T	Temperatur
	Messintervall
	Troposphärische Laufzeitverlängerung
TTA	Zeit bis zum Alarm (engl. Time-to-Alarm)
t_{Δ}	Ortungslatenz
U	Messunsicherheitsvektor der Ausgangsgrößen
u	Distanzvektor Koordinatenursprung – Nutzer
u	Messunsicherheit der Eingangsgröße
v	Elevationswinkel
v	binäre Zustandsvariable
W	Wiederholgenauigkeit
X	Eingangsgröße des Messmodells
x	Koordinate in x im ECEF-Koordinatensystem
\bar{x}	Ortsvektor
\ddot{x}	Näherungskordinate in x im ECEF-Koordinatensystem
Y	Ausgangsgröße des Messmodells
y	Koordinate in y im ECEF-Koordinatensystem
	Größenwert/Messwert
\bar{y}	mittlere Ortsrichtigkeit
\ddot{y}	Näherungskordinate in y im ECEF Koordinatensystem
\hat{y}	Referenzwert
y°	Größenwertsortierte Simulationsausgangswerte
Z	Zenit
z	Koordinate in z im ECEF Koordinatensystem
\ddot{z}	Näherungskordinate in z im ECEF Koordinatensystem
μ	Parameter zur Beschreibung einer Verteilung
σ	Parameter zur Beschreibung einer Verteilung

Indizes

A	verfügbar
Auslöser	Auslöser einer Messung
Bereitstellung	Bereitstellung der Daten
c	erfolgreiche Manöver
d	dynamisch
d	trocken
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
GB	gefährlicher Betrieb
IF	ionosphärenfrei
$k \rightarrow K$	Messwerte
L1	L1-Frequenz
L2	L2-Frequenz
m	Manöver
$m \rightarrow M$	Anzahl der Messmodelleingangsgrößen
mp	Mehrwegeeffekt
Nav	Navigationsnachricht
pK	mögliche Messwerte im Zeitintervall
r	Simulationswert
Ref	Referenz
s	Satellit
s	Statisch
sd	kombiniert aus statischem und dynamischem Anteil
Schnittstelle	Schnittstelle auf Nutzerseite
SP3	Standard Product 3 Format – Präzise Orbit Daten
t	Zeitpunkt
u	Anwender/ User
UA	Unverfügbar
w	Feuchte

1 Einleitung

Mit welcher Genauigkeit lässt sich durch satellitenbasierte Ortungssysteme ein Ort bestimmen? Mit dieser Frage beschäftigten sich das US-amerikanische Verteidigungsministerium und wissenschaftliche Forschungseinrichtungen bereits in der Aufbauphase des Satellitensystems NAVSTAR GPS. Durch die Möglichkeit der satellitenbasierten Ortung sind unzählige Anwendungen mit jeweils individuellen Anforderungen an Qualitätsmerkmale erwachsen [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014]. Besonders komplex ist es, den eigenen, sich in Bewegung befindlichen Ort mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen. Dies ist insbesondere anhand von satellitengestützten oder satellitenbasierten Ortungssystemen möglich. Satellitenbasierte Ortungssysteme basieren auf der Auswertung von Satellitensignalen, wohingegen satellitengestützte Ortungssysteme zusätzlich Daten von Sensoren wie Odometern oder Trägheitssensoren berücksichtigen [vgl. Dziubek et al. 2012].

Globale Navigations Satellitensysteme (GNSS), wie das derzeitige einzige vollfunktionstüchtige System NAVSTAR GPS, das nicht vollfunktionfähige System GLONASS oder die sich im Aufbau befindlichen Systeme Galileo und Baidou, basieren auf Satelliten, die im mittleren Orbit um die Erde kreisen. Mit Kenntnis der Satellitenorte und der Satellitenemissionszeit lässt sich über eine Laufzeitdifferenz der Abstand zu den einzelnen Satelliten berechnen. Satellitenbasierte Ortungssysteme besitzen den Vorteil, dass sie im Vergleich zu anderen Systemen stets absolute, aktuelle Ortswerte ausgeben, die keine akkumulierten Messabweichungen beinhalten und nahezu überall unter jeglichen Wetterbedingungen eingesetzt werden können. Damit ein Ort bestimmt werden kann, benötigt das Ortungssystem eine direkte Sichtverbindung zu mindestens vier Satelliten. Generell und insbesondere in urbanen Gegenden ist dies nicht immer möglich. Trotzdem werden satellitenbasierte Ortungssysteme flächendeckend eingesetzt.

Im Straßenverkehr hat die satellitenbasierte Ortung schon einige Impulse gesetzt: Sie ermöglicht die Navigation mittels Navigationsgeräten, die Fahrern bei der Routenwahl und der Navigation zum gewünschten Ziel helfen. Auch Stauenden können präzise in Karten eingezeichnet werden. Durch verbesserte Genauigkeiten der Ortungssysteme in Kombination mit hochgenauen digitalen Karten und zusätzlicher Sensorik werden weitere Fahrerassistenzsysteme möglich, um den Verkehr sicherer zu gestalten. Denn entsprechend den Angaben des Statistischen Bundesamts zufolge haben verschiedene Verkehrsunfalluntersuchungen gezeigt, dass der Mensch als Führer eines Kraftfahrzeuges oder Verkehrsteilnehmer im Jahr 2012 an 86 Prozent der Unfälle auf deutschen Straßen mindestens eine Mitschuld getragen hat [vgl. Statistisches Bundesamt 2013: 15]. Aus diesem Grund soll der Anteil der Handlungen, die vom Fahrer ausgeführt werden, vereinfacht oder reduziert werden. Deshalb gibt es seit geraumer Zeit Bestrebungen seitens der Automobilhersteller und -entwickler, den Fahrer von seiner Fahrzeugführungsaufgabe durch automatisiertes bis hin zu autonomem Fahren zu entlasten. In naher Zukunft werden Kurvengeschwindigkeitswarnungen den Fahrer vor einem zu schnellen Einfahren in Kurven warnen, adaptives Scheinwerferlicht unabhängig von der Lenkradrichtung Kurven ausleuchten, Einfädelassistenten

das sichere Einfädeln nach einem Überholvorgang ermöglichen und spurgenaue Ortung die kontinuierliche und geschwindigkeitsabhängige Mauterhebung realisieren. In weiterer Zukunft werden die Orte der einzelnen Fahrzeuge mittels Car-to-Car-Kommunikation oder Car-to-Infrastruktur-Kommunikation zwischen Fahrzeugen und/oder der Infrastruktur kommuniziert. Dadurch können sicherheitsrelevante Funktionen wie eine Warnfunktion vor Zügen an unbeschränkten Bahnübergängen ermöglicht werden, die wiederum das Entscheidungsverhalten des Fahrzeugführers beeinflussen. [vgl. Winner 2009]. Für all diese Assistenzsysteme ist das Wissen über den eigenen, meistens in Bewegung befindlichen Ort von immenser Bedeutung.

Im Schienenverkehr basiert die Zugsteuerung hauptsächlich auf der Ortung des Zuges, die derzeit überwiegend mittels der Zugleittechnik infrastrukturseitig stattfindet. Aktuelle Entwicklungen konzentrieren sich auf die Verlagerung von fahrwegseitigen Gleisanlagen zu fahrzeugseitigen Komponenten [vgl. Schnieder/Barbu 2009]. Dieser neue Fokus soll hohe Infrastrukturkosten senken und die durch 2300 Kabeldiebstähle verursachten Verspätungsminuten (240.000 im Jahr 2012 der 17.000 betroffenen Züge) zukünftig verhindern [vgl. Deutsche Bahn 2013]. Dies erfordert eine Ortung der Schienenfahrzeuge mit einer hohen verlässlichen Genauigkeit, welche die Anforderungen an die Gleisselektivität erfüllt. Bis heute ist die satellitenbasierte Ortung begrenzt auf nicht sicherheitstechnische Funktionen wie Fahrgastinformationen und Flottenmanagement oder sie wird nur in Spezialfällen für die Zugortung auf der Strecke und als Teil eines Antikollisionssystems eingesetzt [vgl. Strang/Meyer zu Hörste 2006; Reckter 2017].

In der Luftfahrt ist die Ortung Hauptbestandteil der Navigation und elementare Stütze des Piloten. Dabei bedient sie sich regelmäßig nicht nur der Satellitensignale der GNSS, sondern wird zusätzlich mit Korrektursignalen von geostationären Satellitensystemen wie dem European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) oder anderen Space Based Augmentation Systems (SBAS) unterstützt. Dies ermöglicht die Erfüllung der ICAO Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Integrität während des Reiseflugs [vgl. International Civil Aviation Organization 2006]. Im Jahr 2003 rückte die automatisierte Anflugsteuerung mittels GPS-basierten Landungssystemen in den Vordergrund. Hierbei sendet ein bodengestütztes Ergänzungssystem (Ground Based Augmentation System (GBAS)) aktuelle Satellitenkorrekturdaten an die Ortungseinheit im Flugzeug. Dadurch kann die geforderte Genauigkeit von unter 4 bis 6 m vertikaler Abweichung eingehalten werden [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014].

In der Binnenschifffahrt und auf hoher See werden satellitenbasierte Ortungssysteme bereits seit längerer Zeit zur Navigation und Kollisionsverhütung eingesetzt. Bei dem im Jahr 2008 eröffneten SeaGate in Rostock wird Schiffen beim Einlaufen in den Hafenbereich und beim Anlegen mittels simulierter Galileosignale assistiert. Um ein sicheres Anlegen im Hafenbereich zu ermöglichen, muss eine horizontale Genauigkeit von mindestens 0,5 m gegeben sein [vgl. IEC 61108-1]. Diese Präzision wird bis heute

durch satellitenbasierte Ortung ohne Korrektursysteme noch nicht erreicht, so dass keine automatische Steuerung im Hafenbereich möglich ist.

1.1 Einordnung der Arbeit

Beim teilautomatisierten bis hochautomatisierten Fahren unterliegen eingebettete sicherheitskritische Systeme Anforderungen, deren Verletzung verheerende Auswirkungen für Mensch und Technik haben kann. Daher benötigen sie eine explizite Zulassung, die sicherstellt, dass das System ein bestimmtes Sicherheitsniveau erfüllt. Hersteller, die beispielsweise ihre Systeme für den automobilen Verkehr zulassen möchten, müssen den Sicherheitsnachweis im Einklang mit der Norm ISO 26262 erbringen. Die Norm beschreibt die erforderlichen Konformitätsbewertungen in Abhängigkeit des gewünschten „Automotive Safety Integrity Level“ (ASIL) [vgl. ISO 26262-4].

Für die höchste Sicherheitsstufe ASIL D muss die Zertifizierung des Produktes mit sicherheitsrelevanten Anforderungen durch eine nicht weisungsgebundene Person oder Organisation, die unabhängig vom Produktverantwortlichen in Bezug auf Ressourcen und Produktfreigabe ist, bestätigt werden [vgl. ISO 26262-4]. Dies erfordert die Konformitätsbewertung durch eine unternehmenseigene unabhängige Abteilung (internes Prüflabor) oder durch eine externe anerkannte Stelle (externes Prüflabor, z. B. TÜV Süd AG).

Im Schadensfall wird regelmäßig die Unabhängigkeit des Prüflabors in Frage gestellt, die dann vom Beklagten darzulegen und zu beweisen wäre. Da die Existenz des internen Prüflabors in der Regel vom Gesamterfolg des Unternehmens und vom zu entwickelnden Produkt abhängig ist, wird die Unabhängigkeitserklärung von Prüflaboren im gleichen Unternehmen häufig angezweifelt. [vgl. Schmidt et al. 2011].

Neben der Unabhängigkeit spielt im Schadensfall die Kompetenz der ausführenden Stelle eine entscheidende Rolle. In der Luft- und Raumfahrt, der Kerntechnik sowie im Eisenbahnbereich wird die Kompetenz des Prüflabors durch Akkreditierung nachgewiesen. Hierfür ist in Deutschland die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) zuständig. Diese prüft, ob die unabhängige Stelle die international gültige Norm DIN EN ISO/IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ erfüllt [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025]. Dies stellt sicher, dass im Fall von Rechtsstreitigkeiten Prüfberichte und Zertifikate als Nachweise akzeptiert werden.

Möchte ein Hersteller von Automobilen eine sicherheitsrelevante Funktion oder Komponente zulassen und das Risiko hinsichtlich der Produkt- und Produzentenhaftung reduzieren, wird er die Komponenten, wie in der Luft- und Raumfahrt, Kerntechnik und im Eisenbahnbereich, von einem unabhängigen nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten Prüflabor zertifizieren lassen. Für die Konformitätsbewertung gliedert sich das Verfahren in die Teilprozesse der Qualifizierung, Verifizierung und Validierung. Diese

sind mit den relevanten Komponenten der Teilprozesse in Abbildung 1-1 dargestellt. In unterschiedlichen Branchen wird in unterschiedlicher Reihenfolge vorgegangen.

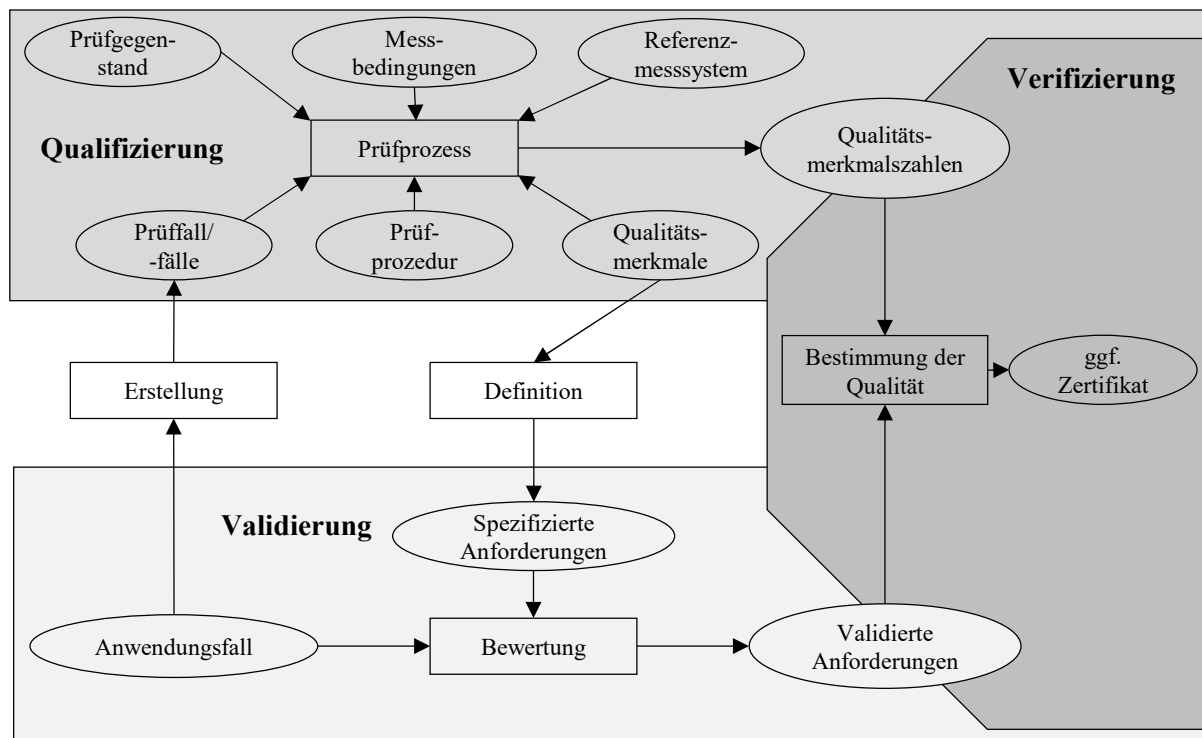


Abbildung 1-1: Komponenten bei der Zertifizierung in Anlehnung an [vgl. Wegener 2013]

Soll ein System für eine sicherheitskritische Anwendung eingesetzt werden, müssen die quantitativen Anforderungen an das System definiert werden. Spezifizierte Anforderungen werden durch die Größe eines Qualitätsmerkmals und dem dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsniveau beziffert. Ob diese Anforderungen für den beabsichtigten Zweck angemessen sind, wird anhand der **Validierung** festgestellt [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]. Folglich entscheidet das Resultat der Validierung darüber, ob die Anforderungen, die der Hersteller an die Funktion oder Sensorik stellt, für den Anwendungsfall gerechtfertigt sind.

Die **Qualifizierung** eines Messsystems besteht aus der Durchführung eines Prüfprozesses. Dieser bedarf einer Prüfprozedur, in der die einzelnen Prozessschritte dokumentiert werden. Die Prüfprozedur umfasst Begriffsdefinitionen, generalisierte Prüffälle oder eine Methode zu deren Entwicklung, Anforderungen an einen Messaufbau, Vorschriften zur Dokumentation oder Einhaltung der Messbedingungen, Vorschriften zur Bereinigung der Daten und Verfahren zur mathematischen Auswertung der Qualitätsmaßzahlen [vgl. Wegener 2013]. Am Ende der Qualifizierung steht das Messresultat in Form von Qualitätsmerkmalszahlen bereit. Um die Qualitätsmerkmale zu bestimmen, werden Referenzdaten, die von einem Referenzmesssystem bereitgestellt werden, mit den gemessenen Werten des Prüfgegenstands verglichen [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]. Die Messdaten werden dabei für verschiedene Prüffälle erhoben, die für die beabsichtigte Anwendung relevant sind.

Die **Verifizierung** oder **Zertifizierung**, wenn sie durch ein akkreditiertes Prüflabor erfolgt, erbringt den objektiven Nachweis, dass das Messsystem die spezifizierten Anforderungen für den beabsichtigten Zweck erfüllt [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]. Dafür werden die Qualitätsmerkmalszahlen mit den validierten Anforderungen an das Messsystem verglichen. Der Grad, mit dem das Messsystem die Anforderungen erfüllt, wird in der Konformitätserklärung dokumentiert. Bei der Zertifizierung wird das erfolgreiche Ergebnis der Konformitätsbewertung in einem Zertifikat festgehalten. Dies bescheinigt, dass die Anforderungen vom Messsystem erfüllt werden.

Diese Arbeit befasst sich mit der Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen als Grundvoraussetzung der Zertifizierung.

1.2 Problemstellung

Qualifizieren entspricht der quantitativen Ermittlung der Messqualität eines Prüfgegenstands unter bestimmten Rahmenbedingungen. Dabei führen nicht deterministisches Verhalten und instationäre Messbedingungen zu erschwerten Bedingungen. In der Praxis ergeben sich daraus verschiedene Bedingungen, die zu erhöhten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Qualitätsmerkmale führen. Bei der Zertifizierung, insbesondere auf der Ebene der Qualifizierung von GNSS-Systemen, haben sich in der Vergangenheit verschiedene Herausforderungen aufgetan, die bis heute nicht gelöst werden konnten. Dazu gehören [vgl. JCGM 100, S. 6]:

- Unpräzise Definition der Messgröße (Abschnitt 1.2.1)
- Unwissenheit über die Effekte der Messbedingungen auf das Messergebnis (Abschnitt 1.2.2)
- Variierende Messergebnisse unter identischen Messbedingungen (Abschnitt 1.2.3)

Auf diese drei Eigenschaften wird im Folgenden eingegangen.

1.2.1 Unpräzise Definition der Qualitätsmerkmale

Ziel einer Qualitätsermittlung ist es, zu einem genauen, eindeutigen und objektiven Messresultat zu kommen [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025]. Dabei ist offen, anhand welcher Qualitätsmerkmale die Anforderungen an das Messsystem für den spezifischen Zweck formuliert werden können. Dafür müssen die Rechenvorschriften der Qualitätsmerkmale eindeutig definiert sein. In den Fachdisziplinen Geodäsie, Luft- und Raumfahrt, Automobil- und Bahntechnik existieren verschiedene Auffassungen der Qualitätsmerkmale, die eine Vergleichbarkeit behindern oder verhindern und zu erhöhtem Prüfaufwand führen. Beispielsweise wird der Terminus *Integrität* in der Luftfahrt als ein Grad des Vertrauens in den vom Messsystem bereitgestellten Ort verwandt [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014: E-2], in der Bahntechnik hingegen wird die Integrität im Kontext der Zugvollständigkeitsprüfung und Sicherheitsintegrität verstanden [vgl. Manz et al.].

Diverse Unschärfen finden ihren Ursprung noch vor der Bestimmung der eigentlichen Qualitätsmerkmale. So werden Messdaten vor der Bestimmung von Qualitätsmaßen um Ausreißer und fehlerhafte Messungen bereinigt [vgl. ISO 5725-1]. Auf welches Verfahren für die Messwertbereinigung zurückgegriffen wird und welcher maximale Anteil an zu eliminierenden Messwerten erlaubt ist, wird dabei oft nicht dargestellt.

Durch Unschärfen bei der Definition auf den Ebenen der Qualitätsmerkmale und der Systemgrenzen des zu qualifizierenden Messsystems kommt es immer wieder zu fehlerhaften Bewertungen von GNSS-Empfängern. Hersteller von GNSS-Empfängern geben einen Größenwert für die Genauigkeit oder die Protektionsgrenze an, ohne die Rechenvorschrift oder die der Protektionsgrenze zugrunde liegende Wahrscheinlichkeitsfunktion darzulegen. Eine detaillierte Berechnung verschiedener eindeutiger Qualitätsmerkmale zur Quantifizierung der Genauigkeit und ihre Transformation in andere Maße wurden von van Diggelen zusammengefasst [vgl. van Diggelen 1998]. Diese Qualitätsmerkmale beruhen auf der Annahme, dass die Stichprobe einer Normalverteilung folgt. Dies ist stark umstritten für kurze Messreihen (mehrere hundert Messwerte), die in kurzen Zeitintervallen durchgeführt werden [vgl. van Diggelen 2007].

Darüber hinaus wird ein Messergebnis in der Regel, sofern möglich, durch Wiederholmessungen gebildet, die unter ähnlichen Messbedingungen stattfinden [vgl. JCGM 100]. Wiederholmessungen lassen sich für GNSS-Messungen aber nur begrenzt mit realen Signalen und Einflüssen verwirklichen. Durch die sich kontinuierlich verändernden Satellitenorte und Einflüsse auf die Signallaufzeit ist es quasi unmöglich, Wiederholmessungen durchzuführen.

1.2.2 Instationäre Messbedingungen

Da Messsysteme (sowohl das zu qualifizierende als auch das Referenzmesssystem) in der Regel direkt oder indirekt mit der Umwelt interagieren, sind die Qualitätsmerkmalswerte, die während der Qualifizierung erhoben werden, von den Messbedingungen abhängig. Die Auswirkung der Messbedingungen auf das Messsystem ist von dessen Aufbau und Messprinzip abhängig. Für Messsysteme, die stark mit der Umwelt interagieren, bedarf es der Definition der Messbedingungen mit Wertebereichen, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Bis heute ist im Bereich der Messbedingungen keine einheitliche übergeordnete Terminologie entwickelt, was sich insbesondere an einer fehlenden Definition in dem Internationalen Wörterbuch der Metrologie (VIM) zeigt [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010].

Qualifizierungen werden unter Umweltbedingungen [vgl. Rakowsky/Richardson 2001], Standardbedingungen [vgl. Katsougiannopoulos et al. 2006], Normbedingungen, Laborbedingungen und weiteren durchgeführt. Die Begrifflichkeiten in dieser Arbeit orientieren sich an der Norm DIN EN ISO/IEC 17025, lediglich gekürzt um den Terminus *Umwelt*. Der Begriff *Messbedingungen* umschließt in dieser Arbeit alle äußeren Einflüsse auf das zu qualifizierende Messsystem [vgl. Adunka 2007; DIN EN

ISO/IEC 17025] [Adunka 2007]. Er wird also relativ weit gefasst, so dass über natürliche Einflüsse hinausgehend auch technische und systemische Einflüsse inbegriffen sind.

Typischerweise wird angenommen, dass der Einfluss der Messbedingungen auf das Messresultat gering ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Messbedingungen durch das Messsystem intern korrigiert wird oder vergleichbare Messbedingungen vorliegen. Soll beispielsweise die präzise geometrische Produktspezifikation ermittelt werden, darf die Messung erst durchgeführt werden, sobald der Prüfgegenstand sich an die Standardbedingungen angepasst hat. Um Längen zu messen, ist beispielsweise als typische Standardbedingung eine Raumtemperatur von 20 °C vorgegeben [vgl. Adunka 2007; ISO 5459-1; JCGM 102]. Dieses Vorgehen ist nur begrenzt übertragbar. Weisen viele Parameter einen Einfluss auf das Messresultat auf, wird es schnell unmöglich Prüfzeiten zu finden, in denen die spezifizierten Messbedingungen vorliegen, soweit diese überhaupt kontrollierbar sind. Ist die Kontrolle von Einflüssen nicht möglich, ein Prüfen dennoch erforderlich, muss auf bestimmte Messbedingungen gewartet werden. Das führt zu erhöhten Kosten und längeren Entwicklungszyklen.

Diese herausfordernden, nicht beeinflussbaren Messbedingungen finden sich bei der Satellitennavigation. Die GPS-Satelliten befinden sich auf kreisförmigen Umlaufbahnen in ca. 20200 km Höhe über der Erdoberfläche mit 55° Inklinationwinkel. Dabei bewegen sich die Satelliten mit einer Umlaufgeschwindigkeit von ca. 3,9 km/s. Dies hat zur Folge, dass zu jedem Zeitpunkt des SID¹ für den Empfänger unterschiedliche Satellitenkonstellationen und damit unterschiedliche Messbedingungen vorliegen. Mit dem Aufbau weiterer Satellitensysteme und deren Kombination wird der kombinierte SID der Systeme weiter ansteigen, da die unterschiedlichen Satellitensysteme auf unterschiedlichen Umlaufbahnen kreisen und die SID der einzelnen Systeme variieren. [vgl. Mansfeld 2010].

Die Güte der Satellitenkonstellation wird anhand des Dilution of Precision (DOP) beschrieben. Überschlagsmäßig gilt dabei die Multiplikation des User Equivalent Ranging Errors (UERE) mit dem DOP als die zu erwartende Genauigkeit. Der DOP kann für die zu erwartende Genauigkeit in horizontalen (HDOP), vertikalen (VDOP) und weiteren Parametern bestimmt werden. [vgl. Mansfeld 2010; Kaplan/Hegarty 2005] Um die Variabilität der Güte der Satellitenkonstellation aufzuzeigen, wird der HDOP für einen SID für eine stationäre Messung in Braunschweig in Abbildung 1-2 dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass große Schwankungen im Verlauf eines Tages auftreten. Der maximale HDOP-Wert liegt bei 1,6 und der minimale Wert bei 0,7. Selbst bei konstantem UERE bedeutet dies eine Verdopplung der zu erwartenden Messabweichung für die Maximalwerte.

¹ SID = Sidereal Day ist die Wiederholperiode, bis eine annähernd gleiche Satellitenkonstellation erreicht ist. Für das GPS Navstar beträgt diese ca. 23 h und 56 Minuten vgl. Misra/Enge [2011]. Für das Galileo System liegt diese bei ca. 239 h und 25 Minuten vgl. Dodel/Häupler [2010].

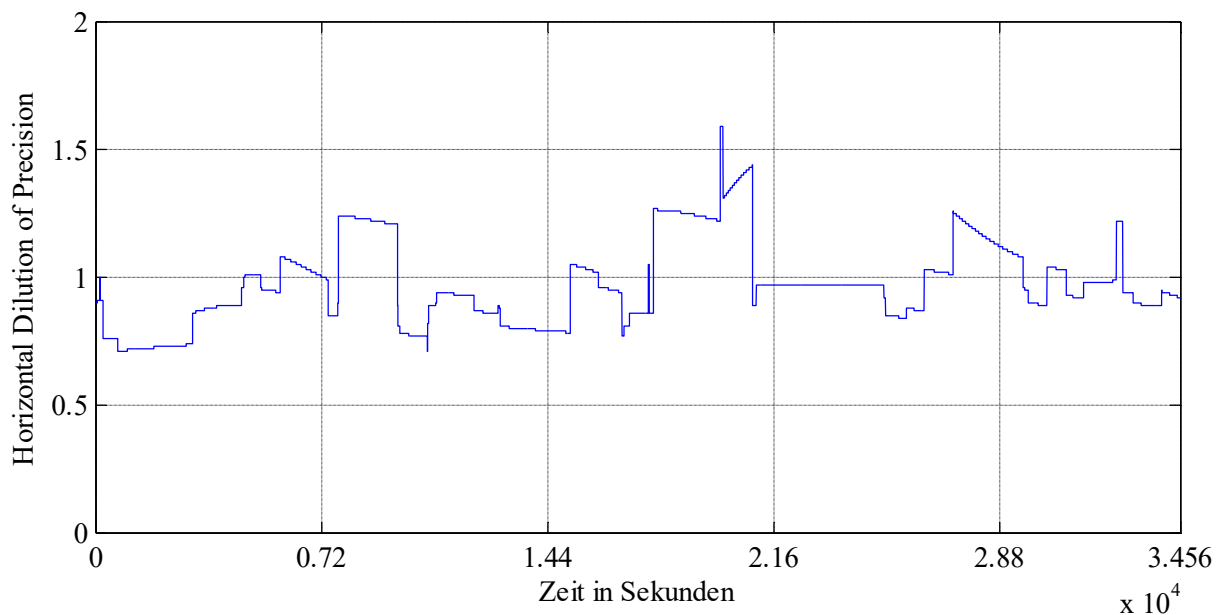


Abbildung 1-2 Dilution of Precision über einen Betrachtungszeitraum von 24 Stunden für einen Ort auf dem Campus Nord in Braunschweig (Lat.: 52,1640 N; Lon.: 10,3219 E)

Im Gegensatz zu herkömmlichen Qualifizierungen, die im Labor unter stationären und somit zeit- und ortsunabhängigen Messbedingungen durchgeführt werden, ist die Qualität von GNSS-Empfängern während realer Fahrttests vom Zeitpunkt der Messung und den zu diesem Zeitpunkt herrschenden Messbedingungen abhängig, sodass instationäre Messbedingungen vorliegen. Dies führt in der Praxis zu schwer vergleichbaren und nicht nachvollziehbaren Messungen, falls die Messbedingungen nicht wie allgemein üblich dokumentiert sind (z. B. in [Le Marchand et al. 2015; Hodon 2013; Poliak 2009; Min et al. 2008; Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. Prüfstelle für Landmaschinen 2002; Godha 2006; Schwienger 2008; Mark Petovello 2014; National Instruments 2013; Mark Petovello 2014]).

1.2.3 Ausgeprägtes stochastisches Systemverhalten

Die meisten sicherheitsrelevanten Systeme, die im Bodenverkehr für den Betrieb zugelassen sind, arbeiten deterministisch. Dies bedeutet, dass das zu erwartende Ergebnis durch die Vorbedingungen eindeutig definiert und beliebig oft wiederholbar ist. Insbesondere im Bahnbereich sind deterministisch arbeitende Systeme weit verbreitet. Durch komplexer werdende Sensoren und Potenziale von Schätzmethoden wird in der Technik zunehmend auf probabilistische Modelle wie z. B. Kalman- und Partikelfilter gesetzt. In Abhängigkeit der Ausgangsgrößen und des zugrunde liegenden Systemverhaltens werden diese in chaosdeterministische oder chaotische Systeme klassifiziert.

- Chaosdeterministische Systeme (schwaches Chaos) zeichnen sich durch das Vorhandensein von seltsamen Attraktoren (Endzustand in einem dynamischen System) aus. Zentrale Eigenschaft von chaosdeterministischen Systemen ist die Konvergenz bzw. Divergenz zu diesen Attraktoren.

- Chaotische Systeme (starkes Chaos) basieren auf keinerlei Attraktoren und unterliegen einem echten Zufallsprozess. Dabei können anfängliche kleine Abweichungen mit der Zeit exponentiell verstärkt werden.

Kleine Störungen der Eingangssignale, wie z. B. das Messrauschen, können durch nichtlineares Verhalten der verarbeitenden Algorithmen stark verstärkt werden und in großen Messabweichungen resultieren. Ein ausgeprägtes stochastisches Verhalten bei der satellitenbasierten Ortung kann u. a. auf die Tracking-Wahrscheinlichkeit der Phasenlösung zurückgeführt werden. Durch das thermische Rauschen, das sich in Vorzeichenwechseln in der Spannung äußert, kommt es zu Abweichungen in den Tracking-Loops, aufgrund derer Informationen, die auf den Signalwellen aufgeprägt sind, nicht ausgelesen werden können. Folglich fehlen diese Informationen bei der Bestimmung des Orts, was wiederum zu stark variierenden Ortsgenauigkeiten führt. [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

In Abbildung 1-3 sind die Messtrajektorien von drei GNSS-Empfängern gleicher Bauart, Baureihe und Konfiguration dargestellt. Als Prüfstrecke diente eine Achterbahn im Heidepark Soltau. Diese wurde ausgewählt, da die gleiche Trajektorie mit einer hohen Genauigkeit wiederholt durchfahren werden konnte und hohe Bewegungsänderungsraten vorhanden sind. Dabei bezeichnet die Höhe über dem Referenzellipsoid die Höhe über der durch die WGS84 definierten Oberfläche des Referenzellipsoids. Die GNSS-Empfänger wurden über einen Antennensplitter mit den gleichen Signalen einer einzelnen aktiven Antenne versorgt. Die Abweichungen zwischen den einzelnen GNSS-Empfängern liegen im Bereich von ± 2 m. Aus der Abbildung geht hervor, dass für anspruchsvolle Abschnitte der Strecke (Startbereich linke Seite und Kreisel in der Mitte) besonders große Differenzen zwischen den Trajektorien bestehen. Im Bereich der langsamen Fahrt vor dem Zu- und Einstieg (linke Seite der Abbildung) konvergieren die gemessenen Trajektorien. Dass die Messtrajektorien stets mit der Prüftrajektorie konvergieren und nicht willkürlich driften, deutet auf ein chaosdeterministisches Verhalten mit seltsamen Attraktoren hin.

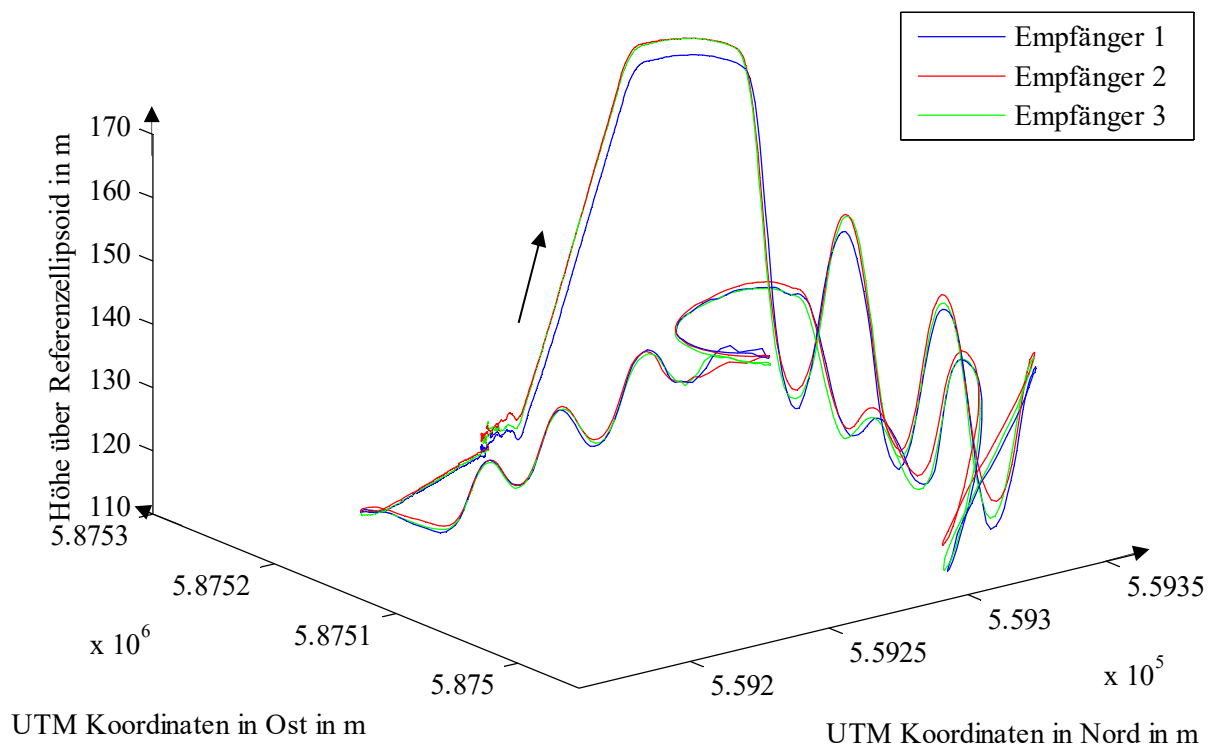


Abbildung 1-3: Unterschiedliche Trajektorien gleicher Empfänger gleicher Bauart und -reihe bei gleichen Eingangssignalen auf einer Achterbahn im Heidepark Soltau [Spiegel et al. 2014]

Dies ist von großer Bedeutung, da bei der Qualifizierung eines Messsystems reproduzierbare Qualitätsmerkmale ermittelt werden sollen. Diese Ergebnisse zeigen, dass bereits die Schwankungen baugleicher Messsysteme die Komplexität für eine aussagekräftige Qualitätsermittlung erhöhen. Diese wird weiter durch die instationären Messbedingungen erhöht.

1.3 Zielsetzung und Vorgehen

Aufbauend auf den Dissertationen von Manz, Lu, Grasso Toro, Poliak und Wegener ist das Ziel dieser neun Kapitel umfassenden Arbeit, die Unschärfen bei der Qualifizierung durch die bisherigen Standards, z. B. EN 16801-1, im Kontext der satellitenbasierten Ortung für sicherheitsrelevante Anwendungen auf der Empfängerebene zu minimieren [Manz 2016; Lu 2014; Grasso Toro 2015; Wegener 2013; DIN EN 16803-1; Poliak 2009]. Der systematische Zusammenhang der einzelnen Kapitel ist in Abbildung 1-4 dargestellt.

Die drei vom Autor bearbeiteten Teilziele (Definition der Qualitätsmerkmale, Einführung eines Maßes zur Beschreibung der Messbedingungen und Charakterisierung des stochastischen Verhaltens) sollen dabei die Lücken schließen, die bei der normkonformen Qualifizierung für sicherheitsrelevante Anwendungen auftreten. Es wird auf die in der Problemstellung dargestellten Hemmnisse bei der Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen eingegangen. Dafür werden in den **Kapiteln 2 bis 4** die Grundlagen und Entwicklungen dargestellt. Im Anschluss beginnt die Forschungsarbeit und die Lösung der im Folgenden beschriebenen Teilziele (**Kapitel 5 bis 7**). Die gewonnenen Erkenntnisse und die

entwickelten Verfahren werden während einer normkonformen Qualifizierung eines Prüfgegenstands angewandt (**Kapitel 8**). Schlussendlich werden in dieser Arbeit die wesentlichen Erkenntnisse zur satellitenbasierten Ortung für sicherheitsrelevante Anwendungen auf Empfängerebene zusammengefasst und bewertet. Zudem wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsaufgaben gegeben und es werden mögliche Lösungsansätze aufgezeigt (**Kapitel 9**).

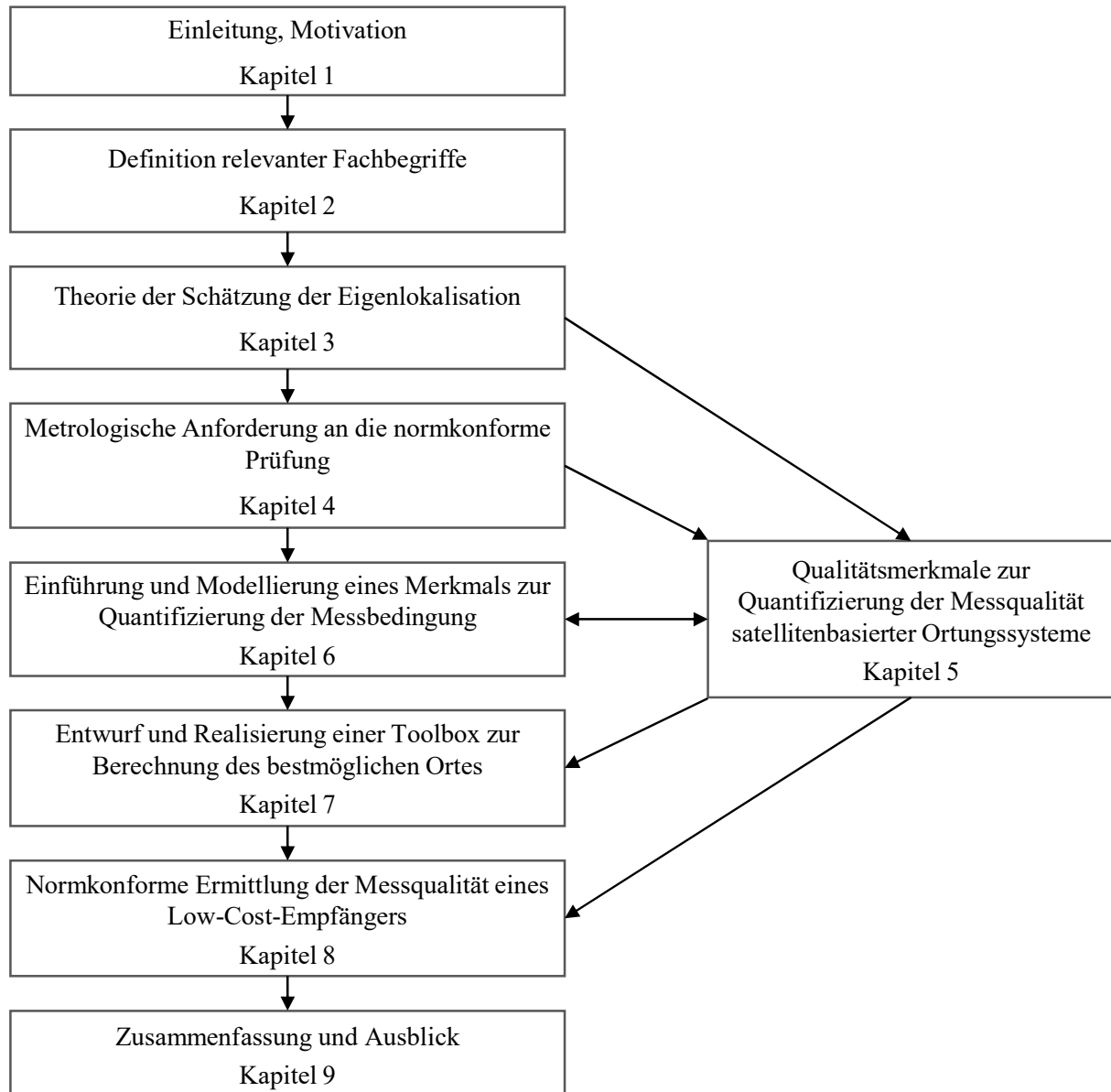


Abbildung 1-4: Struktur der Arbeit

1.3.1 Teilziel 1: Definition der Qualitätsmerkmale

Für unpräzise Formulierungen bei der Definition von Qualitätsmerkmalen werden eindeutige mathematische Definitionen der Qualitätsmerkmale von satellitenbasierten Ortungssystemen für den bodengebundenen Verkehr entwickelt. Folgende Fragen sollen damit beantwortet werden: Wie hoch ist die Ortsgenauigkeit des Messsystems? Wie glaubhaft ist die Qualitätsermittlung?

Dafür werden die relevanten Terminologien, die relevanten metrologischen Begriffe zur Qualitätsbestimmung sowie das Konzept der Messunsicherheit dargestellt (**Kapitel 2**). In **Kapitel 4** werden sodann die metrologischen Anforderungen an die Qualifizierung auf Basis des Standards ISO/IEC 17025 dargestellt und anhand von Beispielen aus vorhandenen Normen dargestellt. Zur Erreichung des Teilziels 1 befasst sich **Kapitel 5** mit den Qualitätseigenschaften von satellitenbasierten Ortungssystemen. Dabei wird in Abschnitt 5.2 auf die Thematik der Eliminierung von Ausreißern eingegangen. Anschließend werden die gängigen Qualitätsmerkmale von satellitenbasierten Ortungssystemen eingeführt und definiert.

1.3.2 Teilziel 2: Einführung eines Maßes zur Beschreibung der Messbedingungen

Das zweite Teilziel der Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode, die Messbedingungen, die während der Messfahrt vorliegen, zu beschreiben und in einem Merkmal zu bündeln. Dafür erfolgt eine Darstellung der Grundlagen des GNSS sowie der Einflüsse auf dessen Messqualität (**Kapitel 3**). Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese quantifiziert werden können und mit welcher Messunsicherheit dies möglich ist. **Kapitel 6** befasst sich mit der Thematik der Dokumentation der Messbedingungen. Basierend auf den realen Einflüssen auf das Messresultat wird dort ein Merkmal eingeführt, um den Einfluss der Messbedingungen zu quantifizieren. Um den Grad des Vertrauens in dieses Merkmal zu erhöhen, wird im Sinn des „Guide to the expression of measurement uncertainty“ eine Messunsicherheitsanalyse integriert [vgl. JCGM 100]. Aufbauend auf dem Merkmal zur Beschreibung der Messbedingungen wird in **Kapitel 7** das Werkzeug CONCAL eingeführt. Dieses Programm berechnet ausgehend von einer Referenztrajektorie eine neue Trajektorie nach dem in Kapitel 6 dargestellten Verfahren, welche die Messbedingungen in einem Merkmal verdichtet. Mithilfe dieses Verfahrens soll eine zeit- und ortsunabhängige Vergleichbarkeit von Prüffahrten ermöglicht werden. Über die Vergleichbarkeit einzelner Empfänger hinaus ermöglicht dieser Ansatz, in ein Fahrzeug integrierte Empfänger-Antennen-Systeme zu vergleichen und gleichzeitig die Anforderungen aus dem Standard DIN IEC/ISO 17025 zu erfüllen:

„Das Laboratorium muss die Umgebungsbedingungen nach den Anforderungen der Spezifikation oder soweit sie die Qualität der Ergebnisse beeinflussen können überwachen, regeln und aufzeichnen.“ [DIN EN ISO/IEC 17025, S. 36].

Dadurch kann die Frage beantwortet werden, unter welchen Messbedingungen die Messungen stattgefunden haben und ob die Qualitätsmerkmale verlässlich ermittelt wurden.

1.3.3 Teilziel 3: Charakterisierung des stochastischen Verhaltens

Das letzte Teilziel ist die Entwicklung eines Qualitätsmerkmals, welches das stochastische Verhalten von Ortungssystemen quantifiziert (**Kapitel 5.4.3**). Dabei sollen die Fragen beantwortet werden: „Sind die Messungen aussagekräftig?“ und „Welchen Einfluss hat das chaosdeterministische Verhalten auf

die Messqualität?“ Die entwickelten Merkmale zur Beschreibung des stochastischen Verhaltens werden anschließend auf eine normkonforme Prüfung angewandt (**Kapitel 8**).

2 Definition relevanter Fachbegriffe

Als Basis einer Systemqualifizierung ist die stringente Definition und Einhaltung eines Terminologiekonstrukts nötig, um Missverständnisse zu verhindern und eine effektive Entwicklungsarbeit zu ermöglichen. An der Qualifizierung eines Systems sind Ingenieure von Sensoren- und Komponentenherstellern, der Systemimplementierung, der Prüforganisation, Betreiber und teilweise Anwender beteiligt. Jede dieser Gruppen - teilweise jede Abteilung in einer Organisation – hat über Jahre eine eigene Fachterminologie entwickelt. Diese wird dabei oft sprachlich verwendet und nie oder lediglich in einfachen Definitionen verschriftlicht. Um Reibungsverlusten durch sprachliche Differenzen vorzubeugen, muss von Beginn einer Entwicklung an eine große Sorgfalt hinsichtlich der Terminologie gelten.

In diesem Kapitel wird auf die relevanten Termini aus dem Bereich der Metrologie (2.1), der Messunsicherheit (2.2), der Messbedingungen (2.3), der verschiedenen Trajektorien während des Prüfprozesses (2.5), der Wiederholung von Messungen (2.6) und dem Bereich der satellitenbasierten Ortung (2.7) eingegangen. Streng genommen sind die Messbedingungen und die Messunsicherheit eine Spezialisierung aus dem Bereich der Metrologie, aufgrund ihrer Bedeutung in dieser Arbeit werden den Termini einzelne Abschnitte gewidmet. Als Basis der allgemeinen metrologischen Fachbegriffe dient das Internationale Wörterbuch der Metrologie (VIM) [Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010], das als weltweites Standardwerk anerkannt ist, sowie die relevante Fachterminologie der Metrologie [DIN 1319-1-4] und der Messunsicherheit [Adunka 2007; Caspary/Wichmann 2007].

2.1 Metrologische Fachbegriffe

Grundsätzlich ist eine Messung ein Prozess, bei dem mehrere Größenwerte, die vernünftigerweise einem Größenwert zugewiesen werden können, auf experimentelle Art bestimmt werden [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]. Messungen können statischer oder dynamischer Natur sein. Eine Messung ist stationär, wenn eine zeitlich unveränderte Messgröße anhand eines Messprinzips gemessen wird, welches nicht auf der zeitlichen Änderung der Messgrößen beruht. Im Gegensatz dazu sind Messungen, die zeitlich veränderlich sind oder deren Wert sich aus zeitlichen Änderungen des Messprinzips ergibt, als dynamische Messungen zu klassifizieren [vgl. DIN 1319-1-4].

Eine Messung wird mit einem Messsystem durchgeführt. Das Messsystem wendet ein oder mehrere Messprinzipien an, z. B. der thermischen Ausdehnung von Flüssigkeiten oder der Geschwindigkeit des Lichtes. Die praktische Anwendung des Messprinzips und Algorithmen zur Bestimmung der Messergebnisse sind in dem Messverfahren dargestellt.

Die Algorithmen zur Bestimmung der Messergebnisse werden auf Basis des Messmodells $y = f(x_1, \dots, x_n)$ bestimmt. In dem Messmodell wird die mathematische Beziehung zwischen allen Größen

definiert, die an der Messung beteiligt sind. Anhand der Messfunktion $f(x_1, \dots, x_n)$ und der Eingangsgrößen des Messmodells x_1, \dots, x_n lassen sich die Ausgangsgrößen des Messmodells y_1, \dots, y_n bestimmen. Ausgangsgrößen des Messmodells sind die eigentlichen Messwerte einer Messgröße.

Zusätzlich zu den Messwerten bedarf es bei der Qualifizierung eines Werts, mit dem der Messwert verglichen werden kann. Dieser Wert, bekannt als Referenzwert, wird durch ein Referenzmesssystem oder ein Normal bereitgestellt. Um sicherzustellen, dass das Referenzmesssystem auch funktionstüchtig ist und die Anforderungen erfüllt, wird das Referenzmesssystem anhand eines Normals kalibriert. Ein Normal ist dabei eine Realisierung der Definition einer Größe, mit Größenwert und beigeordneter Messunsicherheit. Dabei wird in einem internationalen Gremium versucht, das Normal auf Naturkonstanten zurückzuführen. Bis heute ist die Spezifizierung von Normalen für dynamische Messungen ein Forschungsschwerpunkt, für den bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt eine eigene Arbeitsgruppe 8.42 erschaffen wurde [vgl. Physikalisch-Technische Bundesanstalt 2016].

Am Ende des Prüfprozesses steht ein Messergebnis. Das Messergebnis setzt sich aus der Messgröße und der korrespondierenden Messunsicherheit zusammen. Sofern von Bedeutung, werden dem Messergebnis zusätzlich Informationen über die Messbedingungen beigelegt. Ein typisches Messergebnis einer Längenmessung l wäre: $l = 2,03 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %.

2.2 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit bildet den Grad des Vertrauens in das Messergebnis ab. Sie wird durch ein Überdeckungsintervall (eindimensionaler Fall) oder Überdeckungsbereich (mehrdimensionaler Fall) für eine spezifizierte Wahrscheinlichkeit dargestellt. Auf die mathematische Bestimmung der Messunsicherheit wird in Unterkapitel 6.4 eingegangen. Die Wahrscheinlichkeitsangabe gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit der wahre Wert innerhalb des Überdeckungsintervalls bzw. -bereichs liegt. Wenn das Überdeckungsintervall der Messunsicherheit groß ist, ist das Vertrauen in das Messergebnis gering. Ist das Überdeckungsintervall klein, ist das Vertrauen in das Messergebnis groß. Die Messunsicherheit wird für statische Messsysteme nach dem Verfahren des GUM ermittelt [vgl. JCGM 100]. Bei der satellitenbasierten Ortung wird dynamisch gemessen, d.h. das Messergebnis ist zeitvariant. Aus diesem Grund wurde die Bestimmung der statischen Messunsicherheit von Wegener auf Zustandsmodelle erweitert, sodass auch zeitvarianten Messergebnissen ein Überdeckungsintervall zugeordnet werden kann [vgl. Wegener 2013].

Bei der Qualitätsermittlung von satellitenbasierten Ortungssystemen bezieht sich die Messunsicherheit auf die Güte der Bereitstellung eines geeigneten Referenzwerts und dem in Kapitel 6 eingeführten Maß zur Beschreibung des Einflusses der Messbedingungen. Das Messergebnis zweier Messungen im gleichen Systemaufbau ist aufgrund zufälliger Einflüsse nicht identisch. Hier stellt sich die Frage, wann die beiden Messergebnisse (A) in Abbildung 2-1 noch näherungsweise identisch sind oder eine signifikante Abweichung eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse ausschließt. Hierfür muss den Messergebnissen

das Überdeckungsintervall der Messunsicherheit (B, C) zugeordnet werden. Überschneiden sich die Überdeckungsintervalle der Messgrößen (B), kann davon ausgegangen werden, dass das Ergebnis durch die zweite Messung bestätigt wird. Im Gegensatz zu Fall B überschneiden sich die Überdeckungsintervalle der einzelnen Messwerte im Fall C nicht. Dies deutet an, dass die zweite Messung die erste Messung nicht bestätigen wird. Tritt dieser Fall auf, so ist von einem Fehlverhalten des Messsystems oder einer fehlerhaften Bedienung auszugehen, eventuell wird die Messung durch die Restwahrscheinlichkeit $(1-P)$ des Überdeckungsintervalls zufälligerweise nicht abgedeckt.

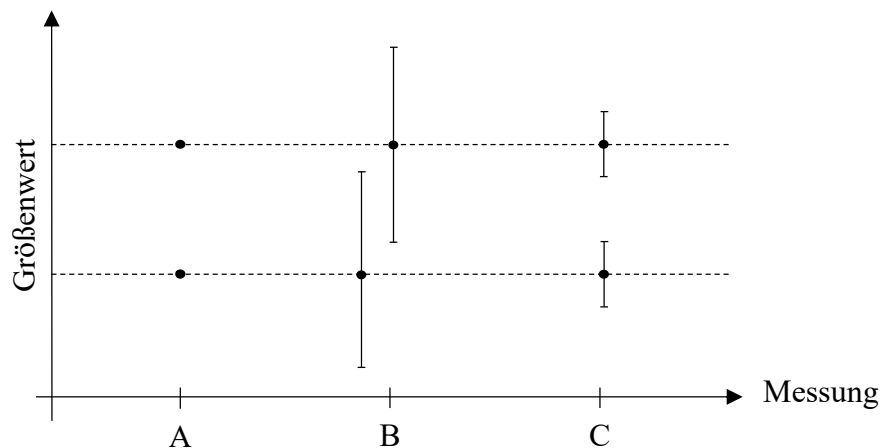


Abbildung 2-1: Vergleich von Messergebnissen mit Hilfe von Messunsicherheiten

2.3 Klassifizierung der Messbedingungen während einer Qualifizierung

Der Terminus **Messbedingung** wird in der Wissenschaft und der Metrologie nicht eindeutig verwendet und wird oft vermischt mit Umweltbedingungen, Standardbedingungen, Bemessungsbetriebsbedingungen, Betriebsbedingungen etc. Weit verbreitet ist der Begriff der Standardbedingungen. In Standardbedingungen sind verschiedene Einflussparameter definiert, denen Standardwerte und mögliche Abweichungen zugeordnet sind [vgl. DIN 1319-1-4].

Vorliegend werden die Messbedingungen in Anlehnung an Adunka verwendet [vgl. Adunka 2007]. Dort wird der Begriff so verstanden, dass die Messbedingungen sich aus den Einflüssen auf das zu qualifizierende Messsystem zusammenfassen. Dieser Begriff wird in dieser Arbeit so weit geöffnet, dass nicht nur natürliche Einflüsse wie Temperatur, Druck und Luftfeuchte, sondern darüber hinaus auch technische (z. B. Algorithmen) und systemische Einflüsse (z. B. Genauigkeit der Korrekturdaten) inbegriffen sind. Nach dieser Vorbetrachtung wird der zentrale Begriff der Messbedingungen definiert als:

„Einflüsse, die auf den Prüfgegenstand wirken und das Messergebnis beeinflussen“.

Einflüsse auf das Messergebnis äußern sich in der Form von Messabweichungen bei der Bestimmung einer Messgröße. Einflüsse können sowohl systematisch oder zufällig ausgeprägt sein.

2.4 Definition der Messabweichungen

Die Termini Messfehler und Messabweichungen sind in der deutschen Sprache weit verbreitet. Der Terminus Messfehler soll jedoch nach DIN 1319 nicht weiter genutzt werden, da er missverständlich wahrgenommen wird [vgl. DIN 1319-1-4]. Mittlerweile zeichnet sich nach Adunka und Caspary/Wichmann ab, dass der Begriff „Fehler“ nur noch verwendet werden soll, wenn eine Messung durch den Bediener fehlerhaft ausgeführt wurde oder das Messgerät einen Defekt aufgewiesen hat [vgl. Adunka 2007; Caspary/Wichmann 2007]. Messabweichungen können nach Adunka in drei Kategorien klassifiziert werden [vgl. Adunka 2007].

Grobe Messabweichungen können nach der neuen Sichtweise als Messfehler (ausgehend davon, dass der wahre Wert nie bekannt ist und alle Messwerte einer Messabweichung unterliegen) bezeichnet werden, da die Messabweichungen auf fehlerhafte Handlungen des Personals oder einem fehlerhaften Messsystem beruhen [vgl. DIN 1319-1-4]. Grobe Messabweichungen zeichnen sich durch Ausreißer ähnliche Werte aus und sind deutlich zu erkennen.

Systematische Messabweichungen umfassen den Anteil an einer Messabweichung, der auf bekannten und damit korrigierbaren Einflüssen beruht. Systematische Messabweichungen können während der Messung einen konstanten Betrag aufweisen oder sich zeitabhängig verändern. [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010] .

Zufällige Messabweichungen sind im Gegensatz zu den systematischen Messabweichungen nicht korrigierbar und nicht vorhersehbar. Sie werden durch Einflüsse verursacht, die nicht bekannt oder quantifizierbar sind. Zufällige Messabweichungen können nach häufigen Untersuchungen quantifiziert und in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt werden.

Zusätzlich zu den drei Kategorien der Messabweichungen sind Korrekturwerte ein elementarer Bestandteil hochwertiger Messsysteme.

Korrekturwerte ermöglichen die Korrektur systematischer Messabweichungen. Diese werden von ergänzenden Sensoren, Systemen oder Korrekturmodellen bereitgestellt. Welche Messabweichungen korrigiert werden, ist von Systemaufbau und Konfiguration abhängig. Im Vergleich zu einfachen Messsystemen zeichnen sich hochwertige Messsysteme dadurch aus, dass diese eine größere Anzahl von systematischen Messabweichungen korrigieren können und die implementierten Korrekturmodelle eine höhere Genauigkeit aufweisen. Korrekturmodelle und Korrekturwerte streuen und weisen somit **Korrekturwertabweichungen** auf. Diese können wiederum zufälliger oder systematischer Natur sein. Korrekturwertabweichungen verdichten den Anteil der Messabweichungen, die durch den eigentlichen Korrekturwert nicht korrigiert werden. Eine Übersicht der Messabweichungen ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

Wird nun ein zu qualifizierendes Messsystem untersucht, äußern sich die zufälligen und systematischen Messabweichungen auf unterschiedliche Art.

Der **bestmögliche Größenwert des Prüfgegenstands (BG)** beschreibt, was der Prüfgegenstand unter den gegebenen Korrekturwertabweichungen, ohne Betrachtung der zufälligen Messabweichungen bedingt durch den Prüfgegenstand, hätte bestimmen können. Der BG ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Welche Korrekturwertabweichungen dabei betrachtet werden, ist vom Systemaufbau und der Konfiguration abhängig. Hochwertige Messsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass diese eine größere Anzahl von systematischen Einflüssen korrigieren können oder die implementierten Korrekturmodelle genauer sind. Der BG wird definiert als ein

„Größenwert, der unter den gegebenen Messbedingungen und Korrekturdaten bzw. Korrekturmodellabweichungen hätte bestimmt werden können.“

Da auch nach dem Stand der Technik nicht alle Einflüsse eindeutig bekannt oder quantifizierbar sind, sind, über die systematischen Messabweichungen hinaus, **zufällige Korrekturwertabweichungen** vorhanden, die nicht nach dem aktuellen Stand der Technik korrigierbar sind. Diese äußern sich in der Präzision des BGs, nachdem alle theoretisch korrigierbaren systematischen Messabweichungen korrigiert wurden. Die Präzision der bestmöglichen Messgröße ist als **Messunsicherheit** bekannt.

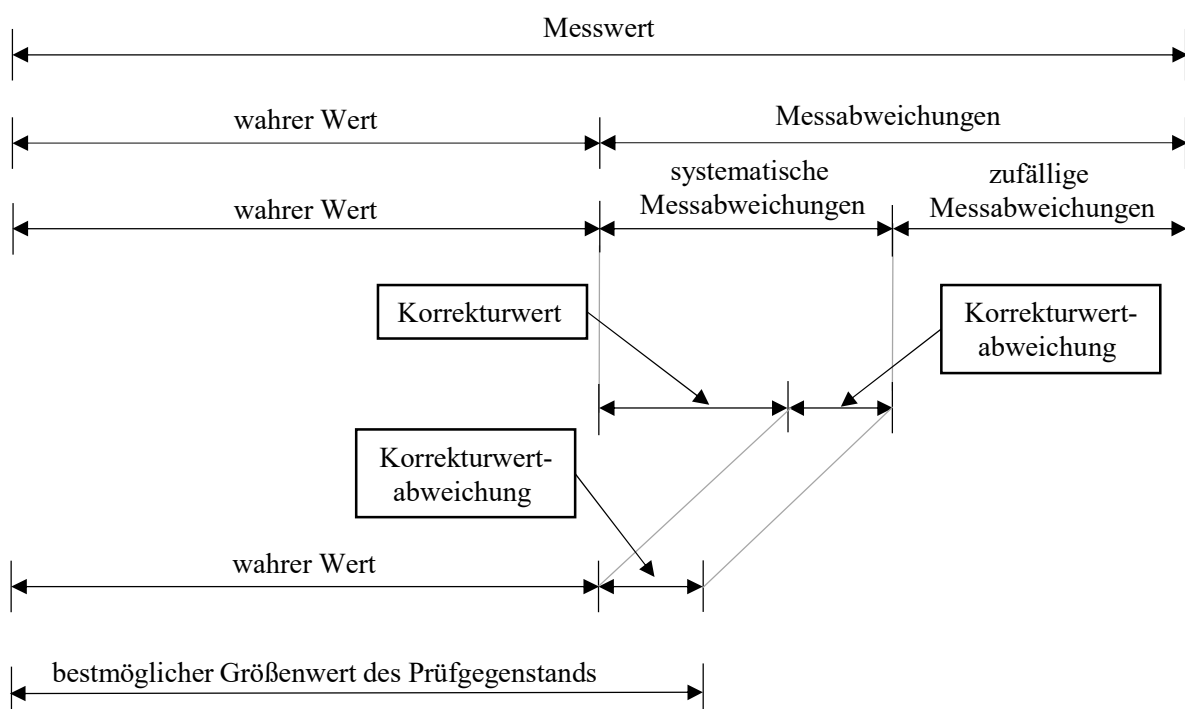


Abbildung 2-2 Exemplarische Messabweichungen während der Qualifizierung

2.5 Trajektorien während des Prüfprozesses

Während einer Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen werden eine Reihe verschiedener Trajektorien erzeugt. Trajektorien sind zeitabhängige Raumkurven, entlang derer sich ein Fahrzeug bewegt. Diese Trajektorien sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

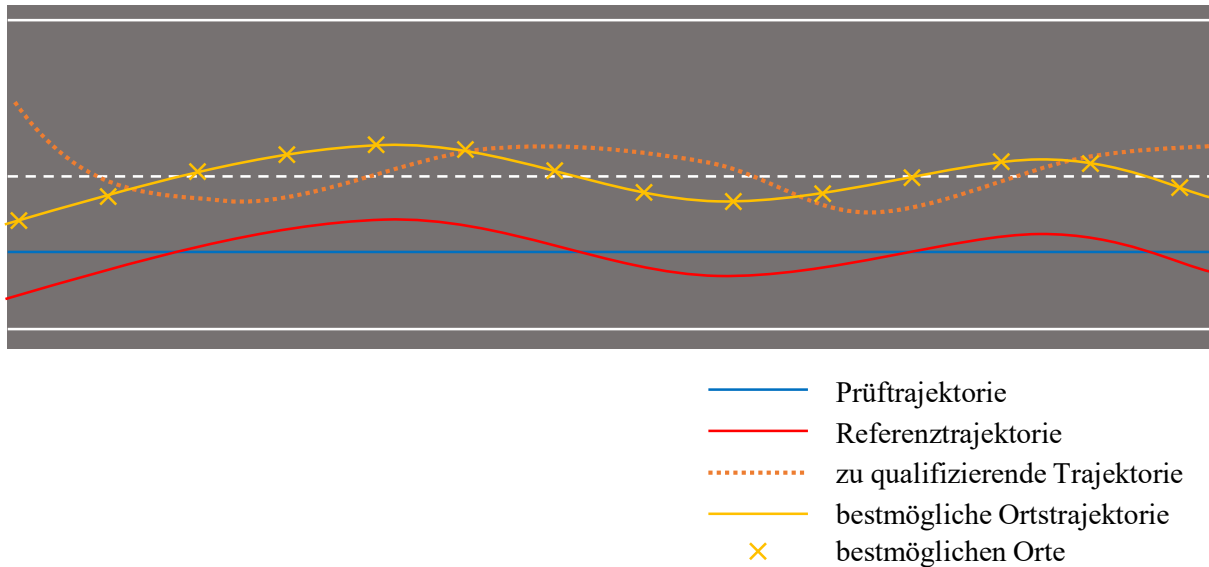


Abbildung 2-3: Trajektorien während des Prüfprozesses

Die durch die Prüfplanung spezifizierte zu fahrende Trajektorie ist die **Prüftrajektorie**. Da der Prüftrajektorie nur näherungsweise gefolgt werden kann, gibt es zusätzlich eine wahre abgefahrte Trajektorie. Streng genommen ist diese nicht genau bekannt (außer in der Simulation) und deshalb in Abbildung 2-3 nicht dargestellt.

Die mit einem Referenzmesssystem gemessene Trajektorie nennt sich **Referenztrajektorie**. Durch die verschiedenen Referenzmesssysteme und ihre Ortsauswertung stehen die Referenzmesswerte, die im Intervall der Messfrequenz aktualisiert werden, nur zu diskreten Zeitpunkten zur Verfügung, sodass die Zwischenwerte interpoliert werden müssen. Die Referenztrajektorie ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Durch Interpolation der Referenzwerte und die Messunsicherheit des Referenzmesssystems sind die Referenztrajektorie und die wahre Trajektorie nie identisch. Die Referenztrajektorie sollte jedoch stets deutlich näher zu der wahren gefahrenen Trajektorie liegen als die zu qualifizierende Trajektorie.

Die vom zu qualifizierenden Ortungssystem berechnete Trajektorie ist die **zu qualifizierende Trajektorie**. Die Ortswerte des zu qualifizierenden Systems stehen ebenfalls nur zu diskreten Zeitpunkten zur Verfügung. Das Zeitintervall zwischen zwei Zeitpunkten wird durch die Messfrequenz des zu qualifizierenden Ortungssystems festgelegt.

Die **bestmögliche Ortstrajektorie** ist eine Aneinanderreihung von bestmöglichen Ortswerten des Prüfgegenstands. Die **bestmöglichen Ortswerte** stehen dabei diskret zu den Zeitpunkten der Referenzwerte zur Verfügung und müssen folglich für Zwischenwerte interpoliert werden.

2.6 Wiederholung von Messungen und deren Quantifizierung

Die in Kapitel 5 dargelegten Qualitätsmaße basieren auf der Differenz einzelner synchronisierter Messwerte zu den assoziierten Referenzmesswerten und werden jeweils für eine einzelne Messung oder über eine Messreihe gebildet. Zur Bestätigung der Größenwerte ist es sinnvoll, Einzelmessungen oder Messreihen zu wiederholen. In Abhängigkeit der Variation einzelner oder mehrerer Einflussgrößen (Systemaufbau, Messbedingungen, Messlabor) wird dabei in Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messwerte unterschieden [vgl. Adunka 2007].

2.6.1 Wiederholbarkeit

Werden mehrere Messungen durch ein gleiches Messverfahren, das gleiche Labor und unter gleichen Messbedingungen durchgeführt, findet eine **Wiederholmessung** statt. Die Wiederholbarkeit wird anhand der Wiederholstreuung (siehe Formel 5-4) mehrerer Wiederholmessungen dargestellt. Die Wiederholstreuung beschreibt das Ausmaß der Annäherung der Messungen [vgl. Adunka 2007]. Darüber hinaus ist es möglich, die Wiederholrichtigkeit zu bestimmen. Diese beschreibt als arithmetischen Mittelwert die systematischen Abweichungen zum Referenzwert der Messungen.

Wiederholmessungen sind im Kontext der satellitenbasierten Ortung durch reale Messungen nicht abzudecken, da jede Messsituation (siehe Abschnitt 1.3.2) einzigartig ist. Dennoch können reale Signale mit geeigneten Rekordern aufgezeichnet und anschließend wiederholt abgespielt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung der Wiederholbarkeit.

2.6.2 Reproduzierbarkeit

Eine **Reproduziermessung** findet statt, wenn sich die Messbedingungen, das ausführende Prüflabor oder das Messprinzip über mehrere Messungen ändert. Die Reproduzierbarkeit kennzeichnet, wie gut eine Messung unter verschiedenen Bedingungen wiederholt werden kann. Die Reproduzierbarkeit kann ähnlich wie die Wiederholbarkeit durch die Reproduzierrichtigkeit (arithmetische Mittelwert zur Untersuchung der systematischen Messabweichungen) und der Reproduzierstreuung (zur Beschreibung der Verteilung der Messwerte) mehrerer Reproduzierungen quantifiziert werden. [vgl. Adunka 2007].

Übertragen auf GNSS-Empfänger bedeutet dies, dass unterschiedliche Prüfgegenstände unter unterschiedlichen Messbedingungen und/oder in verschiedenen Prüflaboren geprüft wird. Dabei zeigt sich die Qualität der verschiedenen Empfänger und die Abhängigkeit von den Messbedingungen. In der GNSS-Wissenschaft und weiteren Wissenschaften wird die Reproduzierbarkeit oft fälschlicherweise mit der Wiederholbarkeit verwechselt.

2.6.3 Vergleichbarkeit

Eine **Vergleichsmessung** ist ein Spezialfall der Reproduzierbarkeit. Eine Vergleichsmessung findet statt, wenn bei variablen Messbedingungen an verschiedenen Orten, jedoch mit demselben Messverfahren, an einem oder mehreren Geräten desselben Typs Messungen durchgeführt werden. Die Vergleichsmessungen sind ein wichtiger Teil von Ringversuchen. Bei deterministischen Systemen ermöglichen Ringversuche eine Aussage über die Messunsicherheit der einzelnen Laboratorien. [vgl. Adunka 2007].

Übertragen auf GNSS-Empfänger bedeutet dies, dass der gleiche Prüfgegenstand oder -typ von mit dem gleichen Messprinzip unter unterschiedlichen Messbedingungen und in unterschiedlichen Laboren untersucht wird.

2.6.4 Vergleich der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit

Die drei unterschiedlichen Bezeichnungen sind hinsichtlich der Messverfahren, des Labors, der Messbedingungen und des Messgeräts in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Die Art der Messung unterscheidet sich anhand des Messverfahrens, des Labors, das hier mehr als eine Institution bzw. Organisation zu verstehen ist als ein räumliches Gebilde, des genutzten Messgeräts und der Messbedingungen. Es ist zu beachten, dass bei der Bestimmung der Reproduzierbarkeit mindestens eine der in der Tabelle aufgeführten variablen Eigenschaften über die Messungen erhalten bleiben muss.

Tabelle 2-1: Vergleich der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit

	Messverfahren	Labor /Ausführende Stelle	Messbedingungen	Messgerät
Wiederholbarkeit	identisch	identisch	identisch	identisch
Reproduzierbarkeit	variabel	variabel	variabel	variabel
Vergleichbarkeit	identisch	variabel	variabel	identisch

2.7 Relevante Fachbegriffe aus der Satellitenortung

Ortung ist historisch bekannt aus der Geodäsie, Luftfahrt und Schifffahrt, wo die zentrale Herausforderung besteht, zu jedem Zeitpunkt zu wissen, wo sich das System befindet. Nach Schnieder ist die Ortung definiert als

„die Bestimmung des Bewegungszustandes eines bestimmten Verkehrsmittels (d. h. Position, Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung bezogen auf einen Bezugspunkt des Verkehrsmittels) in einem Bezugssystem.“ [Schnieder 2012: 213]

Diese Definition der Ortung ist ähnlich den PVT- Informationen (Position, Velocity, Timing), die in der englischen Sprache Gebrauch finden, dort wird jedoch der Bezug „Bewegungszustandes *eines bestimmten Verkehrsmittels*“ vernachlässigt. In dieser Arbeit wird Orten als

„die Bestimmung des Eigenorts eines Fahrzeuges in einem Bezugssystem zu einem definierten Zeitpunkt“

verstanden. Da die Geschwindigkeit in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt, wird der Ort als Vektor der Ortsdaten und des korrespondierenden Zeitpunkts begriffen, wohlwissend, dass die Geschwindigkeit zur Beschreibung des Orts dient.

Die Ortung wird durch ein Ortungssystem durchgeführt. Das Ortungssystem besteht in diesem Fall aus einem **GNSS-Satellitenempfänger** (im weiteren Verlauf nur noch als GNSS-Empfänger bezeichnet) und einer Empfangsantenne (im weiteren Verlauf nur noch als Antenne bezeichnet). Bei der satellitenbasierten Ortung wird nicht der Ort des Empfängers bestimmt, sondern der Ort des Antennenzenstrums, der durch den Hersteller festgelegt wird. Wird in dieser Arbeit die Distanz zwischen Satellit und Empfänger gemeint, ist dies die Distanz zwischen dem Ort des Antennenzenstrums des Satelliten, das aus den Navigationsnachrichten bestimmt wird, und des Antennenzenstrums des Empfängers.

Die **geometrische Distanz** (engl. geometric range), oft auch als euklidischer Abstand bezeichnet, wird in dieser Arbeit als der wahre Abstand zwischen dem Referenzort und dem Satellitenort bezeichnet.

Im Gegensatz dazu ist die **Pseudodistanz** (engl. pseudo range) die vom GNSS-Empfänger gemessene Distanz zwischen den Antennen des GNSS-Empfängers und des Satelliten. Die Pseudodistanz beinhaltet zusätzlich zu den Abweichungen, die auf dem Empfänger beruhen, die Abweichungen, die durch Einflüsse aus den Messbedingungen resultieren.

3 Theorie der Schätzung der Eigenortung

Dieses Kapitel umfasst die Theorie der Schätzung der Eigenortung von GNSS-Empfängern und der Einflüsse auf das Messergebnis, als Basis für die Modellierung des Merkmals zur Quantifizierung der Messbedingungen. Das Kapitel beginnt mit der Beschreibung der Ortsschätzung (Abschnitt 3.1) im Kontext der satellitenbasierten Ortung. Im weiteren Verlauf wird auf die einzelnen Einflüsse, die die Qualität der satellitenbasierten Ortung beeinflussen, eingegangen (Abschnitt 3.3 bis Abschnitt 3.9). Dabei werden die Einflüsse in der Reihenfolge beschrieben, in der sie auf dem Weg von der Erzeugung im Satelliten bis zur Empfangsantenne auftreten. Die Einflussgrößen und deren mögliche Größenwertermittlung und die Messunsicherheit werden bei der Bestimmung im Hinblick auf die in Abschnitt 6.6 und 7.6 eingesetzten Algorithmen und Referenzgrößen beschrieben. Über die in dieser Arbeit dargestellten Verfahren ist eine Vielzahl auch qualitativ hochwertiger aus der Geodäsie stammender Algorithmen bekannt. Da diese Arbeit im Kontext von Automotive-GNSS-Empfängern in dynamischer Anwendung anzusiedeln ist, werden die Standardalgorithmen und Modelle dargestellt, die in diesen GNSS-Empfängern umgesetzt werden. Abschließend wird auf die Gründe für das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern (Abschnitt 3.10) eingegangen.

3.1 Schätzung des Orts

Die satellitenbasierte Ortung basiert auf dem Messprinzip der Laufzeitmessung [vgl. Mansfeld 2010]. Dabei wird das Zeitintervall bestimmt, welches ein Signal vom Sender zum Empfänger benötigt. Dieses Zeitintervall, als Signallaufzeit bekannt, wird mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für die elektromagnetischen Wellen, der Lichtgeschwindigkeit, multipliziert, um die Distanz zwischen Sender und Empfänger zu ermitteln. Wird die Distanz zu mehreren Sendern gemessen und die Orte der Sender sind dem Empfänger bekannt, kann anhand dieser Informationen der Ort des Empfängers berechnet werden. Damit die Orte der Satelliten bestimmt werden können, senden die Satelliten in einer Navigationsnachricht Ephemeriden, die es ermöglichen, den Satellitenort zu einem spezifizierten Zeitpunkt zu bestimmen. [vgl. U. S. Department of Defense 1995].

Um den Ort eines Nutzers eindeutig zu definieren, sind im dynamischen Kontext drei Raumkoordinaten und eine Information über die zeitliche Gültigkeit nötig. Die Raumkoordinaten werden vorwiegend in einem Earth Centered Earth Fixed (ECEF) Koordinatensystem, bei dem der Ursprung (0, 0, 0) im Massenmittelpunkt der Erde liegt, oder, wie in der Navigation üblich, im World Geodetic System (WGS) 84 dargestellt. Der Zeitpunkt der Gültigkeit wird in Coordinated Universal Time (UTC) oder GPS-Zeit bereitgestellt.

Das Signal wird zum Zeitpunkt t_s des Satelliten ausgesandt und erreicht den Nutzer zum Zeitpunkt t_u . Folglich ergibt sich die Satellitensignallaufzeit Δt aus

$$\Delta t = t_u - t_s. \quad (3-1)$$

Wird die Signallaufzeit mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c multipliziert, wird die geometrische Distanz r ermittelt.

Die Gleichung 3-1 gilt jedoch nur für den Fall, dass die Uhren in dem Satelliten und dem Empfänger synchronisiert sind. In den Satelliten werden hochgenaue Wasserstoff-Maser verbaut, die weitestgehend einem mathematisch beschreibbaren Alterungsverhalten folgen, welches anhand von drei Parametern, die in der Navigationsnachricht übertragen werden, bestimmt werden kann. Im Gegensatz zu den Uhren in den Satelliten, wird auf große und energieintensive Uhren in den Empfängern verzichtet. Dies hat zur Folge, dass die Empfängeruhrenabweichung zu jedem Messwert bestimmt werden muss. Die durch den Empfänger ermittelte Distanz, welche die geometrische Distanz sowie die systematischen und zufälligen Abweichungen umfasst, wird allgemein als Pseudodistanz ρ betitelt.

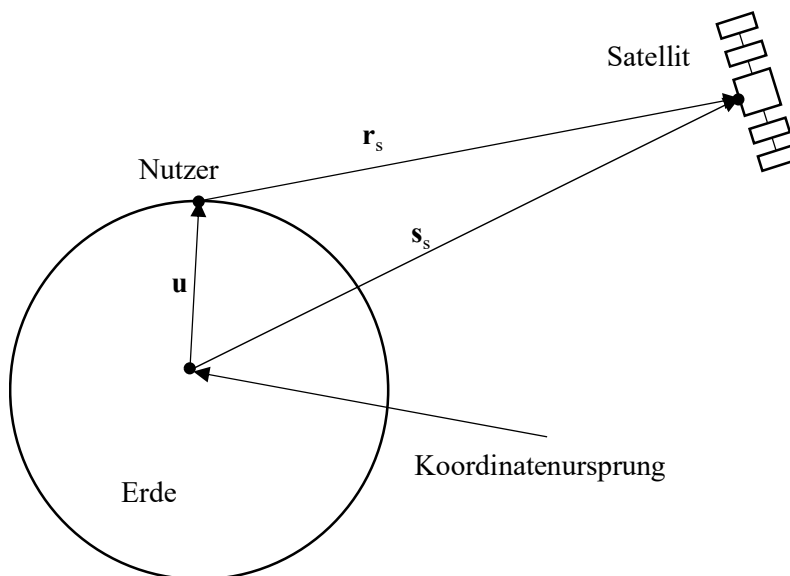


Abbildung 3-1: Vektorielle Darstellung der Erde, des Satelliten und Empfängers

In Abbildung 3-1 sind schematisch ein Satellit, der Empfänger und der Masseschwerpunkt der Erde eingezeichnet. Der Vektor \mathbf{u} stellt die Distanz zwischen dem Koordinatenursprung und dem Ort des Empfängers dar. Der Vektor \mathbf{s}_s bezieht die Distanz des Satelliten zum Koordinatenursprung. Es liegt folgende Beziehung zwischen der geometrischen Distanz, dem Satelliten und der vom Empfänger gemessenen Signallaufzeit vor:

$$r_s = |\mathbf{s}_s - \mathbf{u}| = c \cdot \Delta t. \quad (3-2)$$

Mit Berücksichtigung der Uhrenabweichungen des Empfängers und des Satelliten und der Einführung der Pseudodistanz ergibt sich

$$\rho_s = |\mathbf{s}_s - \mathbf{u}| = r_s + c \cdot (\delta t_u - \delta t_s). \quad (3-3)$$

Dabei werden die Parameter zur Bestimmung der Satellitenuhrenabweichung über die Navigationsnachricht an den Nutzer mit einer hinreichenden Genauigkeit übermittelt, sodass δt_s als bekannt angenommen werden kann. Somit lässt sich die Pseudodistanzgleichung zu:

$$\rho_s - c \cdot \delta t_u = |\mathbf{s}_s - \mathbf{u}| \quad (3-4)$$

vereinfachen. Wird Gleichung 3-4 nach der Pseudodistanz aufgelöst, ergibt sich die zu lösende Gleichung zur Bestimmung des Orts als:

$$\rho_s = \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} + c \cdot \delta t_u, \quad (3-5)$$

in der x_s, y_s, z_s die Koordinaten der Satelliten, x_u, y_u, z_u die unbekannten Nutzerkoordinaten und δt_u die Empfängeruhrenabweichung beschreibt. Um die vier unbekannten Variablen ($x_u, y_u, z_u, \delta t_u$) zu bestimmen, werden die Satellitenorte und Signallaufzeiten von mindestens vier Satelliten benötigt.

Dieses nichtlineare Gleichungssystem lässt sich durch mehrere Vorgehensweisen (Closed Loop, iterative Verfahren mit Linearisierung oder Minimum-Varianz-Schätzer in Zustandsraumdarstellung) lösen. Für ungekoppelte Systeme hat sich in der Praxis ein iteratives Verfahren mit einer Taylor-Reihen-Linearisierung durchgesetzt. [vgl. Misra/Enge 2011].

Der unbekannte Empfängerort und die Empfängeruhrenabweichung werden dabei in einen Näherungswert ($\check{x}_u, \check{y}_u, \check{z}_u, \check{\delta t}_u$) und in eine inkrementelle Komponente ($\Delta x_u, \Delta y_u, \Delta z_u, \Delta \delta t_u$) geteilt.

$$\begin{aligned} x_u &= \check{x}_u + \Delta x_u \\ y_u &= \check{y}_u + \Delta y_u \\ z_u &= \check{z}_u + \Delta z_u \\ \delta t_u &= \check{\delta t}_u + \Delta \delta t_u \end{aligned} \quad (3-6)$$

Ausgehend von einem Startwert (oft die letzte Ortslösung, sonst bei Neustart das Koordinatenzentrum (0,0,0)) kann die inkrementelle Komponente bestimmt werden. Dafür wird eine Taylor-Reihenentwicklung durchgeführt und nach dem ersten Glied abgebrochen. Eine detaillierte Erklärung befindet sich unter anderem in [Kaplan/Hegarty 2005]. Es gilt der Zusammenhang für die inkrementelle Komponente der abweichungsbehafteten Pseudodistanz aus Gleichung 3-7.

$$\Delta \rho = \mathbf{H} \cdot \Delta \hat{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (3-7)$$

Der Vektor der Näherungswerte $\Delta \rho$ berechnet sich aus der Geometriematrix \mathbf{H} , dem Näherungsvektor $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ und dem Vektor der Messabweichungen $\boldsymbol{\varepsilon}$, in denen die Einflüsse gebündelt sind.

$$\Delta \rho = \begin{bmatrix} \Delta \rho_1 \\ \Delta \rho_2 \\ \Delta \rho_3 \\ \Delta \rho_4 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_i - \hat{x}_u}{\hat{r}_i} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \Delta \hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c \cdot \Delta t_u \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix}. \quad (3-8)$$

Durch Umformen und unter Einsatz des Kleinste-Quadrate-Verfahrens kann die Lösung für die inkrementelle Komponente bestimmt werden [vgl. Kaplan/Hegarty 2005]

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (\Delta \boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\varepsilon}) \quad (3-9)$$

Mit dem bekannten $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ können anhand der Gleichung 3-6 der Ort des Empfängers und die Empfängeruhrenabweichung bestimmt werden. Sind die Werte der inkrementellen Komponenten groß, ist eine weitere Iteration nötig. Dafür werden der Ort des GNSS-Empfängers und die Satellitenuhrenabweichung aus der letzten Iterationsschleife übernommen. Dieses Verfahren hat die Eigenschaft, sehr schnell zu konvergieren, so dass in der Regel nach sechs Iterationen das Iterationsverfahren ein hinreichend genaues Ergebnis liefert. [vgl. Misra/Enge 2011].

3.2 Schätzung der Ortsabweichung

Die Genauigkeit der Ortsbestimmung basiert auf der Genauigkeit der Pseudodistanzmessungen (UERE - User Equivalent Ranging Error) und der zu dem Zeitpunkt der Messung vorliegenden geometrischen Satellitenkonstellation der für die Ortslösung genutzten Satelliten. Die vorliegende geometrische Satellitenkonstellation, bekannt als Dilution of Precision (DOP), beschreibt auf Basis der Geometriematrix aus Formel 3-8 den Einfluss der UERE auf die Streuung der Ortsschätzung. Es gilt die Standardabweichung des Orts s_u

$$s_u = UERE \cdot DOP. \quad (3-10)$$

Ein exemplarischer Verlauf der DOPs über einen Tag ist in Abbildung 1-2 dargestellt. Nach Kaplan und Hegarty; Misra und Enge; Hofmann-Wellenhof et al. sind sieben Einflüsse maßgebliche Auslöser für die Ortsabweichungen. Die Auswirkung der Einflüsse wird als Verlängerung der Pseudodistanzen in der Einheit Meter angegeben. Die Verlängerung ist dabei abhängig von der Technologie des GNSS-Empfängers [vgl. Kaplan/Hegarty 2005; Misra/Enge 2011; Hofmann-Wellenhof et al. 2003].

Tabelle 3-1 zeigt ein typisches Abweichungsbudget für einen C/A Code-Empfänger. Die Einflüsse aus der Tabelle können in zwei Kategorien klassifiziert werden, die empfängerabhängigen und die empfängerunabhängigen. Mit Ausnahme des Empfängerrauschens und der Empfänger Auflösung können die Einflüsse aus Tabelle 3-1 der empfängerunabhängigen Kategorie zugeordnet werden.

Tabelle 3-1: Typisches UERE Abweichungsbudget für GPS Signale in der Ortung [Kaplan/Hegarty 2005: 322]

Segmente	Einfluss	Geschätzter Einfluss in m (Normalverteilung 1 σ)
Space bzw. Kontrollsegment	Ephemeridenabweichungen	1.1
	C/A Code Übertragungsverlängerung	0.3
	Ephemeridenfehler	0.8
Anwender	Ionosphärenverlängerung	7.0
	Troposphärenverlängerung	0.2
	Empfängerrauschen und –auflösung	0.1
	Mehrwegeeffekte	0.2
System UERE	Gesamt	7.1

Die Einflüsse aus Tabelle 3-1 können durch verschiedene Korrektursysteme in Echtzeit (RTK, DGPS) oder im Postprozess korrigiert werden. Neben Korrekturmethode, die auf zusätzliche Schnittstellen und Übertragungswege angewiesen sind, besteht die Möglichkeit, die Einflüsse in Echtzeit anhand von Space Based Augmentation Systemen (SBAS) zu korrigieren. Ein von der ESA betriebenes SBAS mit dem Korrekturprinzip des differenziellen globalen Ortungssystems (DGPS) ist der European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS). Die zwei aktiven geostationären Satelliten senden die von einem Korrekturstationssystem auf der Erde ermittelten Korrekturdaten auf dem L1-Band. Diese ermöglichen die Korrektur der Ionosphäre, der Satellitenuhren und –bahnabweichungen sowie die Identifikation von Satellitenausfällen. Durch den Einsatz von EGNOS-Korrekturdaten soll die Ortspräzision (Definition siehe Abschnitt 5.4) auf drei Meter in der Horizontalen und vier Meter in der Vertikalen (95 % Wahrscheinlichkeit) verbessert werden [vgl. European GNSS Agency 2014a]. Die einzelnen Korrekturparameter werden in den folgenden Unterkapiteln zu den Einflüssen dargestellt.

3.3 Einflüsse auf das Messergebnis und deren Quantifizierung

Die Einflüsse, die einen maßgeblichen Effekt auf die satellitenbasierte Ortung besitzen, sind in Tabelle 3-1 dargestellt. Die für die Quantifizierung der Messbedingungen wichtigen empfängerunabhängigen Einflüsse resultieren aufsummiert in dem Messabweichungsvektor ε_s des Satelliten s . Dieser lässt sich berechnen nach:

$$\varepsilon_s = -\delta t_s \cdot c + \delta d_{orb} + \delta d_{ion} + \delta d_{trop} + \delta d_{mp} \quad (3-11)$$

Der Messabweichungsvektor setzt sich zusammen aus der Uhrenabweichung des Satelliten δt_s , der Abweichung der Orbitdaten δd_{orb} , der Laufwegverlängerung durch den Einfluss der Ionosphäre δd_{ion} , und der Troposphäre δd_{trop} und durch Mehrwegeausbreitung δd_{mp} . Da sich in dieser Arbeit auf die

Einflüsse der Messbedingungen konzentriert wird, werden die Einflüsse bedingt durch den GNSS-Empfänger nicht weiter betrachtet. Glücklicherweise lassen sich einige der Einflüsse durch Modelle oder Korrekturdaten beschreiben. Folglich kann der Anteil der einzelnen Einflüsse korrigiert werden. Auf die einzelnen Einflüsse entlang des Signallaufwegs wird im Folgenden näher eingegangen. Es wird jeweils ein typisches Verfahren zur Bestimmung der Einflüsse vorgestellt, welches in den gängigen GNSS-Empfängern implementiert ist. Zusätzlich werden zu jedem Einfluss verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie ein genauerer Referenzmesswert bestimmt werden kann. Da zu jedem Referenzmesswert eine Messunsicherheit gehört, wird diese für die ausgewählten Verfahren bereitgestellt.

3.4 Einfluss der Ephemeridenabweichung

Die erste Aufgabe des Empfängers nach dem Start ist die Demodulierung der auf den Trägerwellen aufmodulierten Ephemeriden zur Berechnung des Orts des Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Berechnungsverfahren ist in den offiziellen Spezifikationsdokumenten, z. B. [U. S. Department of Defense 1995], beschrieben. Die Navigationsnachrichten haben eine Gültigkeit von zwei bis vier Stunden. Durch die Gültigkeitsdauern und hohen Reisegeschwindigkeiten der Satelliten variiert die Genauigkeit der Satellitenorte über die Gültigkeitsdauer.

Von Warren wurde gezeigt, dass der für die Satellitenortung bedeutsame radiale Abstand an typischen Tagen im Bereich von wenigen Metern liegt [Warren 2002], der eine horizontale Ortsabweichung auf Nutzerebene von 1,1 Metern (1σ) bewirkt [vgl. Kaplan/Hegarty 2005]. An vereinzelt Tagen und bei fehlerhaftem Verhalten der Satelliten sind in der Vergangenheit Abweichungen in der Größenordnung von mehreren 100 Kilometern aufgetreten [vgl. Warren 2002].

Korrekturdaten

Die tatsächliche Abweichung der Satelliten von den auf Basis der Navigationsnachricht bestimmten Satellitenorten wird in der EGNOS-Nachricht 25 übertragen. Die drei Korrekturwerte werden auf die aus den Navigationsnachrichten bestimmten Satellitenorte aufsummiert. Zusätzlich gibt es einen Faktor, der bei Bedarf die Änderungsrate der Korrekturdaten überträgt. Dieser wird aus Dateneffizienzgründen jedoch nicht mehr übertragen. [vgl. DO-229-D].

Quantifizierung

Welche Messabweichung die Satelliten zu den aus der Navigationsnachricht berechneten Bahndaten besitzen, kann auf Basis einer Differenzenbildung bestimmt werden. Dabei dienen als Referenzwert die finalen Satellitenkoordinaten des International GNSS-Service (IGS) [vgl. International GNSS Service 2015].

Durch eine Vielzahl von Basisstationen und Rechenalgorithmen werden hochgenaue Satellitenorbits ermittelt. Diese werden anschließend in verschiedenen Formaten und Frequenzen freiverfügbar bereitgestellt. Die „finalen“ Daten sind die mit der höchsten Präzision. Sie beinhalten die Satellitenorte für

alle Satelliten in 30 s Abständen. Da mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit kein genauer Zeitpunkt der Signalemissionszeit getroffen wurde, müssen die bereitgestellten Daten interpoliert werden.

Die Interpolation der Satellitenorte wurde vielfach untersucht. Bewertet wird die Genauigkeit der Interpolationsverfahren anhand der als wahr angenommenen Orbitdaten auf Basis von Lasermessungen und aus zufällig ausgewählten interpolierten präzisen Orbitdaten. Gängige Interpolationsverfahren sind die nach Lagrange und Chebyshev sowie das Trigonometrische. Das Lagrange Verfahren erfordert, dass die Anzahl der Stützwerte gleich der Anzahl der Datenpunkte ist. Bei der Chebyshev Interpolation ist diese Anforderung nicht gegeben. Dennoch sind die Resultate der beiden Verfahren sehr ähnlich. Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit der Interpolation der drei Verfahren finden sich in [Feng/Zheng 2005] und [Schenewerk 2003]. Die ermittelten empirischen Standardabweichungen der Verfahren sind ähnlich, wohingegen maximale Abweichungen bei Feng und Zheng geringer ausfallen als bei Schenewerk [vgl. Feng/Zheng 2005; Schenewerk 2003]. Ein Auszug der empirischen Standardabweichungen und der maximalen Abweichungen sind in Abhängigkeit der gewählten Anzahl von Interpolationskoeffizienten in Tabelle 3-2 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Interpolationsverfahren mit neun und elf Koeffizienten gute Resultate bieten. Der IGS empfiehlt die Nutzung des Lagrange Verfahrens zur Interpolation von präzisen Orbitdaten, sodass für die weitere Bearbeitung in dieser Arbeit auf die Lagrange Interpolation zurückgegriffen wird [vgl. Feng/Zheng 2005].

Tabelle 3-2: Genauigkeit verschiedener Interpolationsverfahren in Abhängigkeit der Anzahl der Interpolationskoeffizienten für die Interpolation der Satellitenorte aus den präzisen Orbits in ECEF-Koordinaten [vgl. Feng/Zheng 2005]

Stützwerte	Lagrange		Chebyshev		Trigonometrische	
	s in cm	Max. in cm	s in cm	Max. in cm	s in cm	Max. in cm
5	913.7	5595.4	913.7	5595.4	423.9	2506.0
7	12.5	126.1	12.5	126.1	0.6	6.3
9	0.2	3.4	0.2	3.4	0.1	1.3
11	0.2	2.5	0.2	2.5	0.2	2.4
13	0.3	4.9	0.3	4.9	0.3	4.6
15	0.8	11.4	0.8	11.4	0.8	10.4
17	2.6	32.7	2.6	32.7	0.3	3.2

Sind die präzisen Satellitendaten interpoliert, müssen die IGS-Daten und die Navigationsnachrichten auf den gleichen Ort des Satelliten referenziert werden. Die präzisen Orbitdaten beziehen sich für die älteren B2/B2A Satelliten auf den Masseschwerpunkt, sodass für diese Satelliten ein Offset (x - Sonnenebene, y, z - Richtung des Erdzentrums) von 0,279 m, 0,00 m, 1,023 m aufsummiert werden muss, damit der Ort des Antennenzenrums bekannt ist [vgl. Héroux/Kouba 2001; Kouba 2009]. Die Anpas-

sung kann anhand einer Koordinatentransformation durchgeführt werden. Hier wurde auf die Transformation nach Montenbruck zurückgegriffen [vgl. Montenbruck et al. 2015]. Für die neueren Satelliten ist keine Korrektur erforderlich.

Ist der Antennenoffset korrigiert, können die Orbitabweichungen anhand der Gleichung 3-12 bestimmt werden. Dabei ist für die satellitenbasierte Ortung die radiale Abweichung in Richtung des GNSS-Empfängers von Bedeutung. Um diese zu bestimmen, werden die Skalare zwischen dem Satellitenort auf Basis der Navigationsnachricht und dem Referenzort sowie zwischen den präzisen Orbitdaten und dem Referenzort gebildet und anschließend differenziert.

$$\delta d_{orb} = \begin{vmatrix} x_{Nav} - x_{Ref} \\ y_{Nav} - y_{Ref} \\ z_{Nav} - z_{Ref} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} x_{SP3} - x_{Ref} \\ y_{SP3} - y_{Ref} \\ z_{SP3} - z_{Ref} \end{vmatrix} \quad (3-12)$$

Messunsicherheit der Orbitreferenzdaten

Die Messunsicherheit des Satellitenorts zu dem Zeitpunkt der Signalemittierung ist abhängig von der Präzision der in den präzisen Orbits bereitgestellten Satellitenorte und der Präzision des Interpolationsverfahrens. Nach der IGS weisen die ermittelten Orte der Satelliten eine empirische Standardabweichung (1 σ bei zugrunde liegender Normalverteilung) von 2 cm auf [vgl. International GNSS Service 2015]. Alternativ kann anhand eines Faktors, der in den SP3-c Nachrichten angegeben ist, über eine Multiplikation eine Standardabweichung für die dort angegebenen Satellitenorte und Satellitenuhrenabweichung berechnet werden [vgl. Hilla 2010]. Die durch das gewählte Lagrange Interpolationsverfahren eingebrachte Messunsicherheit von 0,2 cm (1 σ bei angenommenen Normalverteilung) muss zusätzlich berücksichtigt werden.

3.5 Einfluss der Satellitenuhrenabweichung

Satellitenuhren sind das Kernstück jedes GNSS-Satelliten. Die eingesetzten Rubidiumuhren müssten eine Million Jahre laufen, um auf eine Abweichung von 3 s zu kommen². Die Uhrenabweichungen können geschätzt und anhand eines Polynoms bestimmt werden. Dafür beinhaltet jede Navigationsnachricht Werte für Satellitenuhrenbias, -beschleunigung und -beschleunigungsänderung (wird mittlerweile oft mit dem Wert 0 angegeben). Mit Hilfe des in der SIS Spezifizierung definierten Polynoms kann so die Satellitenuhrenabweichung ermittelt werden [vgl. U. S. Department of Defense 1995].

² 3 Sekunden in einer Million Jahre ist nicht viel verglichen mit einer normalen Uhr. Wird bedacht, dass sich das Signal mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, resultiert durch die Uhrenabweichung eine Laufzeitverlängerung von ca. 2,4 Metern pro Tag, die jedoch mathematisch gut beschrieben werden kann.

Korrekturdaten

Der EGNOS stellt in MT 25 Parameter zur Bestimmung der Abweichung der Satellitenuhr in Form eines Bias und Änderungsraten bereit. Diese werden ebenfalls anhand eines Polynoms bestimmt und auf die Schätzung der Uhrenabweichung auf Basis der Parameter der Navigationsnachricht aufsummiert. In der Regel wird die Änderungsrate nicht mehr übertragen, da das Alterungsverhalten sehr gut geschätzt werden kann [vgl. DO-229-D].

Quantifizierung der Uhrenabweichung

Die Satellitenuhren werden parallel zu den Bahndaten durch den International GNSS-Service überwacht und ausgewertet. Dieser stellt Daten mit verschiedenen Genauigkeiten und Zeitintervallen bereit. Der finale Datensatz enthält Satellitenuhrkorrekturen in 5 min und in 30 s Intervallen [vgl. Hesselbarth/Wanninger 2008]. Ebenso wie die Orbitdaten müssen die Uhrendaten interpoliert werden. Dies kann anhand des gleichen Verfahrens wie in Kapitel 3.4 durchgeführt werden.

Messunsicherheit der Uhrenabweichung der Referenz

Die Messunsicherheit der Satellitenuhrbeobachtungen wird nach Hesselbarth und Wanninger mit einer Richtigkeit von 75 ps und einer Präzision von 20 ps angegeben [Hesselbarth/Wanninger 2008]. Übertragen auf die zurückgelegte Strecke des Lichts kann die Satellitenuhrenrichtigkeit mit 2,2 cm und einer Präzision von 0,6 cm (1σ) angegeben werden. Die Werte sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst. Zusätzlich muss die Messunsicherheit durch das Interpolationsverfahren berücksichtigt werden. Hierfür werden die Daten aus Abschnitt 3.4 übernommen.

Tabelle 3-3: Messunsicherheit der Satellitenuhrbeobachtungen

Messunsicherheit	Größenwert und Dimension	Häufigkeitsverteilung
Satellitenuhrenabweichung	$\mu \sim 75 \text{ ps } (\sim 2,25 \text{ cm})$ $\sigma \sim 20 \text{ ps } (\sim 0,6 \text{ cm})$	normalverteilt (1σ)

3.6 Einfluss der Ionosphäre

Die Ionosphäre setzt sich zusammen aus freien Elektronen und Ionen, die durch Sonnenstrahlung entstehen. Bei starker Sonnenstrahlung nimmt die Höhe der Ionosphärenschicht zu und bei geringer Sonnenstrahlung ab, dadurch variieren die physikalischen Eigenschaften der Ionosphäre über den Tag. [vgl. Misra/Enge 2011].

Zur Hochzeit des elfjährigen Sonnenzyklus oder bei starken Sonneneruptionen steigt die durch die Ionosphäre bedingte Laufwegverlängerung so an, dass es zur Störung der satellitenbasierten Ortung kommen kann. Diese Störungen treten besonders häufig in äquatornahen Zonen (hohe Elektronendichte) und an den Polen (starke Gradienten) auf [vgl. Mansfeld 2010].

Die Aktivität der Ionosphäre wird anhand von Total Electron Content Units (TECU) beschrieben. Die Laufwegverlängerung lässt sich anhand der Dichte der Elektronen entlang des Signalwegs bestimmen. Die Ionosphäre besitzt die Eigenschaften eines dispersiven Mediums, daher ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig von der durchdringenden Frequenz der betroffenen Welle. Diese Eigenschaft ermöglicht die Bestimmung des Einflusses der Ionosphäre durch den Vergleich zweier Signale auf unterschiedlichen Frequenzen. Der Einfluss der Ionosphäre auf den Signallaufweg ist abhängig vom Weg, den die Signale durch die Ionosphäre nehmen. Der Signallaufweg ist wiederum abhängig von der Elevation des Satelliten. Somit ist bei Satelliten, die am Zenit stehen, der kleinste Einfluss und bei Satelliten mit geringen Elevationswinkeln der größte Einfluss messbar.

Empfängerschätzung

Für Einfrequenzempfänger kann der Ionosphäreneinfluss über parametrisierte Modelle wie dem gängigen Verfahren nach Klobuchar geschätzt werden [vgl. Klobuchar 1987]. Dies beruht auf den von den GPS-Satelliten in der Navigationsnachricht ausgesandten Parametern α_n und β_n . Anhand dieser Parameter ist es möglich, die vertikale Laufwegverlängerung für die IPP zu bestimmen, die anschließend über einen Mappingfaktor in die Laufwegverlängerung umgerechnet werden kann. Das Modell nach Klobuchar korrigiert erfahrungsgemäß jedoch nur ca. 50 % des Einflusses der Ionosphäre [vgl. Misra/Enge 2011].

Korrekturdaten

EGNOS-Korrekturdaten stellen über die Korrekturnachricht MT 26 Informationen über die ionosphärische vertikale Laufwegverlängerung an Stützpunkten (werden in MT 18 bereitgestellt) des ionosphärischen Netzes bereit. Über lineare Interpolation der vertikalen Laufwegverlängerung und Multiplikation mit einem Mappingfaktor kann die Laufwegverlängerung für einzelnen Satelliten bestimmt werden. Die ionosphärische Laufzeitkorrektur ist dabei stets negativ [vgl. DO-229-D].

3.6.1 Quantifizierung der ionosphärischen Laufzeitverlängerung

Daten über die ionosphärische Laufzeitverlängerung lassen sich auf verschiedenste Art und Weise akquirieren. Die IGS berechnet aus den ihr zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten der Referenzstationen VTEC-Werte für die Knotenpunkte eines Rasters von 5° Längengraden und 2.5° Breitengraden in Zwei-Stunden-Intervallen. Für die anschließende Interpolation der Werte stehen dem Benutzer diverse Verfahren zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit, soweit ein Mehrfrequenzempfänger zur Verfügung steht, ist das direkte Bestimmen der ionosphärischen Laufwegverlängerung über eine Linearkombination der Signale auf unterschiedlichen Frequenzen. Diese ist deutlich genauer.

Die um den Einfluss der Ionosphäre korrigierte Pseudodistanz ρ_{IF} lässt sich durch die Gleichung 3-13 bestimmen [vgl. Kaplan/Hegarty 2005]. Der Einfluss der Ionosphäre ergibt sich nach

$$\rho_{IF} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} (\rho_{L1} - \rho_{L2}). \quad (3-13)$$

Dabei sind ρ_{L1} und ρ_{L2} die gemessenen Pseudodistanzen auf den Frequenzen f_{L1} und f_{L2} . Wird nun die Differenz zwischen gemessener und der um die ionosphärische Laufwegverlängerung korrigierten Pseudodistanz gebildet, ergibt sich die ionosphärische Laufwegverlängerung.

Da die Pseudodistanzen einem Rauschen unterliegen, hat es sich in der Vergangenheit bewährt, sie mit den deutlich rauschärmeren aber mehrdeutigen Trägerphasenmessungen vor der Berechnung der Laufwegverlängerung der Ionosphäre zu glätten. Nach Misra/Enge haben sich drei verschiedene Glättungsalgorithmen für die Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverlängerung durchgesetzt [vgl. Misra/Enge 2011; Kaplan/Hegarty 2005]. Diese sind "Combined Code And Carrier Smoothing (CCCSF)" [Gao et al. 2002], "Hatch Smoothing Filter" [Hatch 1985] sowie der "Bernese Smoothing Algorithm" [Dach et al. 2015]. In dieser Arbeit wird der Hatchfilter ausgewählt, da der Filter ohne Mehrdeutigkeitslösung angewandt werden kann [vgl. Hatch 1985]. Der Hatchfilter kann anhand des Integrationsfensters beeinflusst werden. Die Federal Aviation Administration (FAA) schlägt ein 100-Sekundenfenster für Messungen mit einer Frequenz von 1 Hz vor [vgl. Powell et al. 2007]. Dieses wurde in der Arbeit übernommen. Eine detaillierte Beschreibung des Hatchfilters ist in [Misra/Enge 2011] zu finden. Die Nachteile des Hatchfilters durch die Mittelung der Messwerte treten durch die geringen Änderungen der Ionosphäre in den hiesigen Breitengraden nur sehr begrenzt auf [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

3.6.2 Messunsicherheit

Die ionosphärische Laufwegverlängerung setzt sich aus den Einflüssen erster und höherer Ordnung zusammen. Für einen Mehrfrequenzempfänger lassen sich anhand der Linearkombination die Einflüsse der ersten Ordnung bestimmen. Wie in Hoque/Jakowski dargestellt, ist der Einfluss der Terme höherer Ordnung im Bereich von wenigen Zentimetern oder Millimetern. Die Messunsicherheit der Mehrfrequenzempfänger bei der Bestimmung der ionosphärischen Laufwegverlängerung wird mit weniger als 1% angegeben. Die Messunsicherheiten sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst. [vgl. Hoque/Jakowski].

Tabelle 3-4: Messunsicherheit der Bestimmung der ionosphärischen Laufwegverlängerung [Hoque/Jakowski; Schüler 2001]

Messunsicherheit der Linearkombination	Größenwert und Dimension	Häufigkeitsverteilung (Typ A)
1. Ordnung	1 % der geschätzten Laufzeitverlängerung	Normalverteilt (1 Sigma)
2. Ordnung	10 mm	Normalverteilt (1 Sigma)
3. Ordnung	1 mm	Normalverteilt (1 Sigma)

Zusätzlich beeinflusst die Schätzung der ionosphärischen Laufwegverlängerung die Distanz zwischen der Korrekturstation und dem Prüfgegenstand. Dabei lässt sich die Messunsicherheit bei einer Basislinie unter 20 km vernachlässigen [vgl. Hofmann-Wellenhof et al. 2003].

3.7 Einfluss der Troposphäre

Die Troposphäre ist die niedrigste Schicht der Atmosphäre. Innerhalb dieser Schicht wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Satellitensignale auf den für die Satellitenortung genutzten Frequenzen reduziert. Im Gegensatz zur Ionosphäre ist die Troposphäre ein nicht dispersives Medium, was eine Bestimmung über eine Signalkombination verhindert.

Quantifizierung der Troposphäre

Der Einfluss der Troposphäre kann anhand einer Radiosonde ermittelt werden [vgl. Askne/Nordius 1987]. Steht keine Radiosonde zur Verfügung, liefert eine Berechnung auf Basis der lokalen Temperatur, des lokalen Drucks und der relativen Feuchte Ergebnisse [vgl. Katsougiannopoulos et al. 2006]. Die Laufwegverlängerung für einen im Zenit stehenden Satelliten ergibt sich nach [vgl. Kaplan/Hegarty 2005] aus

$$\delta d_{trop,Z} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{d,o} \cdot h_d + N_{w,o} \cdot h_w]. \quad (3-14)$$

In der Gleichung 3-14 setzt sich die Laufzeitverlängerung $\delta d_{trop,Z}$ aus dem hydrostatischen Anteil (bis in ca. 40 km Höhe) der Luft $N_{d,o} \cdot h_d$ und dem nassen Anteil (bis in ca. 10 km Höhe) der Luft $N_{w,o} \cdot h_w$ zusammen [vgl. Hopfield 1969]. Der hydrostatische Anteil macht ca. 90 % der gesamten Laufzeitverlängerung aus und kann genau geschätzt werden. Der nasse Anteil, der auf der Luftfeuchtigkeit beruht, ist hingegen ähnlich schwer wie das Wetter vorherzusagen.

Beide Anteile können anhand des Druckes und der absoluten Temperatur auf Meereshöhe geschätzt werden [vgl. Smith/Weintraub 1952]. Für den Brechungsindex des trockenen Anteils gilt

$$N_{d,o} = a_1 \frac{p_0}{T_0}. \quad (3-15)$$

In der Gleichung ist p_0 der Partialdruck der Luft auf Meereshöhe, T_0 die absolute Temperatur auf Meereshöhe und a_1 eine empirische Konstante (77,624 K/mbar) [vgl. Smith/Weintraub 1952] [vgl. Smith/Weintraub 1952]. Der Brechungsindex des nassen Anteils berechnet sich aus

$$N_{w,o} = a_2 \frac{e_0}{T_0} + a_3 \frac{e_0}{T_0^2}. \quad (3-16)$$

In der Gleichung stehen e_0 für die partielle Luftfeuchtigkeit auf Meereshöhe, T_0 für die absolute Temperatur auf Meereshöhe und a_2 und a_3 sind empirische Konstanten (-12,92 K/mbar und 371,9 K²/mbar).

Die Laufwegverlängerung variiert zusätzlich in Abhängigkeit der Höhe des GNSS-Empfängers. Nach Smith/Weintraub lässt sich der trockene Luft Anteil um den Einfluss der Höhe erweitern zu [vgl. Smith/Weintraub 1952]

$$N_d(h) = N_{d,0} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^\gamma \quad (3-17)$$

mit h_d als das obere Ende der Troposphäre referenziert auf die Meereshöhe und γ , der Kompressibilität, aus der idealen Gasgleichung. Dabei hat Hopfield erforscht, dass für einen Wert von γ gleich vier die genauesten Ergebnisse erzielt werden [vgl. Hopfield 1969]. Die Höhe der Troposphäre h_d lässt sich nach

$$h_d = 0.011385 \frac{p_0}{N_{d,0} * 10^{-6}} \quad (3-18)$$

bestimmen.

Ebenso wird der Brechungsindex $N_w(h)$ von der hydrostatischen Komponente in Abhängigkeit der Höhe des GNSS-Empfängers ermittelt [vgl. Smith/Weintraub 1952].

$$N_w(h) = N_{w,0} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^\gamma. \quad (3-19)$$

Mit h_w :

$$h_w = 0.0113851 \frac{1}{N_{w,0} * 10^{-6}} \left[\frac{1,255}{T_0} + 0.05 \right] e_0, \quad (3-20)$$

kann die Laufwegverlängerung für einen im Zenit stehenden Satelliten bestimmt werden [vgl. Smith/Weintraub 1952].

3.7.1 Mappingfunktionen

Um die in der Troposphäre erzeugte Laufwegverlängerung zu bestimmen, sind die lokale Temperatur, die Höhe über dem Meeresspiegel und die lokale Luftfeuchtigkeit ausreichend. Diese Formel ist jedoch nur für Satelliten, die im Zenit stehen, gültig. Für andere Satelliten muss Gleichung 3-14 um den längeren Signalweg durch die schräg geschnittene Troposphäre erweitert werden. Dies geschieht durch Mappingfunktionen.

Verschiedene Mappingfunktionen stehen zur Verfügung. Die älteste und weit geläufigste ist die Saastamoinen Mappingfunktion. Wie auch die anderen in [Katsougiannopoulos et al. 2006] untersuchten Funktionen, hat die Mappingfunktion Schwächen bei Satelliten mit geringen Elevationswinkeln. Vielversprechender sind nach Katsougiannopoulos et al. die Ifadis und die Neill Mappingfunktionen.

An dieser Stelle wird auf die Ifadis Mappingfunktion eingegangen, da sie im Gegensatz zur Neill Mappingfunktion den Längengrad berücksichtigt und dadurch für Europa bessere Daten liefert. [vgl. Katsougiannopoulos et al. 2006].

Der Ifadis Ansatz basiert auf einer Funktion dritter Ordnung. Diese Funktion wird sowohl für den hydrostatischen als auch den trockenen Einfluss genutzt, jedoch die Konstanten variiert. Die folgende Funktion ermittelt den Mappingfaktor zur Korrektur der vertikalen troposphärischen Laufwegverlängerung für Satelliten, die nicht im Zenit stehen. Der Mappingfaktor $m(v)$ in Abhängigkeit der Elevation v des Satelliten berechnet sich für den hydrostatischen Anteil nach [vgl. Ifadis 2000]:

$$m(v) = \frac{1}{\sin(v) + \frac{a}{\sin(v) + \frac{b}{\sin(v) + 0.078}}}. \quad (3-21)$$

Dabei wird der Mappingfaktor für $m(90^\circ) = 1$ definiert und v ist der Elevationswinkel des zu ermittelnden Satelliten; a und b werden anhand des Oberflächendrucks und der lokalen Temperatur geschätzt. Es gilt:

$$a = k_1 + k_2(P - 1000) + k_3(t - 15.0) + k_4\sqrt{e} \quad (3-22)$$

$$b = k_1 + k_2(P - 1000) + k_3(t - 15.0) + k_4\sqrt{e} \quad (3-23)$$

Dabei ist P der totale Druck an der Erdoberfläche, e die partielle Luftfeuchtigkeit und t die Oberflächentemperatur in Grad Celsius. Bei k_1 bis k_4 handelt es sich um global gültige Konstanten [vgl. Ifadis 2000].

Tabelle 3-5: Global gültige Konstanten für die Ifadis Mapping Funktion [vgl. Ifadis 2000]

	k_1	k_2	k_3	k_4
a	$0.123664 \cdot 10^{-2}$	$0.131566 \cdot 10^{-6}$	$0.137817 \cdot 10^{-5}$	$0.805749 \cdot 10^{-5}$
b	$0.333305 \cdot 10^{-4}$	$0.194556 \cdot 10^{-6}$	$0.103965 \cdot 10^{-5}$	$0.174658 \cdot 10^{-4}$

Für den nassen Anteil wird ähnlich vorgegangen, lediglich die Konstanten in Gleichung 3-21 und Tabelle 3-5 werden angepasst. Aus dem Mappingfaktor und der troposphärischen Laufwegverlängerung im Zenit kann schließend die Laufwegverlängerung für die einzelnen Satelliten nach

$$\delta d_{trop} = m(v) \cdot \delta d_{trop,Z} \quad (3-24)$$

bestimmt werden.

3.7.2 Standardatmosphärenparameter

Um den troposphärischen Einfluss auf den Signallaufweg zu reduzieren, wurden verschiedene Korrekturmodelle entwickelt. Dabei hat sich das in den SIS-Dokumenten dargestellte Standardatmosphären-

modell etabliert. Auf Basis verschiedener numerischer Wettermodelle wurden für verschiedene Breitengrade Durchschnittswerte für den Druck, die Luftfeuchte und den Partialdruck ermittelt. Da diese Werte über die Jahreszeit stark variieren, wurden zusätzlich noch Parameter zur Beschreibung der saisonalen Variation eingeführt. Auf Basis der Gleichungen in z. B. der DO-229 kann durch lineare Interpolation der trockene Luftanteil im Zenit für den geschätzten Ort ermittelt werden [vgl. DO-229-D].

Tabelle 3-6: Metrologische Parameter zur Schätzung der troposphärischen Laufzeitverlängerung [vgl. DO-229-D]

	Durchschnitt					Saisonale Variation			
Breitengrad (°)	P_0 (mbar)	T_0 (K)	e_0 (mbar)	β_0 (K/m)	λ_0 (°K)/m	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta \beta$ (K/m)
< 15°	1013.25	299.65	26.31	6.30e-3	2.77	0.00	0.00	0.00	0.00e-3
30	1017.25	284.15	21.79	6.05e-3	3.15	-3.75	7.00	8.85	0.25e-3
45	1015.75	283.15	11.66	5.58e-3	2.57	-2.25	11.00	7.24	0.32e-3
60	1011.75	272.15	6.78	5.39e-3	1.81	-1.75	15.00	5.36	0.81e-3
> 75°	1013.00	263.65	4.11	4.53e-3	1.55	-0.50	14.50	3.39	0.62e-3

3.7.3 Unsicherheit

Nach Misra und Enge kann die Laufwegverlängerung im Zenit durch den trockenen Luftanteil anhand der Modelle basierend auf präzisen Atmosphären-Messungen mit einer Genauigkeit im Bereich von Millimetern berechnet werden. Die dazugehörige Laufwegverlängerung durch den hydrostatischen Luftanteil variiert mit der Verteilung des Wasserdampfs entlang der Signalausbreitung und weist große Gradienten auf. Die Schätzung der hydrostatischen Laufwegverlängerung weist eine größere Messunsicherheit auf und liegt im Bereich von 1-2 cm im Zenit (1 Sigma Wahrscheinlichkeit) [vgl. Misra/Enge 2011].

Die Messunsicherheit der einzelnen Satellitensignale kann über die Multiplikation der Messunsicherheit der trockenen oder hydrostatischen Laufwegverlängerung im Zenit mit dem Mappingfaktor ermittelt werden. Für drei ausgewählte Mappingfunktionen (MF) (Neil, Sempel und feucht & trockene MF) ist die Messunsicherheit der troposphärischen Laufwegschätzung in Abbildung 3-2 dargestellt. Aus der Abbildung ergibt sich, dass die Laufwegverlängerungen bei einem Elevationswinkel von null bis dreizehn Grad sehr unterschiedlich sind. Dabei weist die Neill MF, gefolgt von der feucht und trocken geteilten MF, die größten Messunsicherheiten auf, die Sempel MF deutlich geringere. Ab einem Elevationswinkel größer zwölf Grad weisen die MF ein ähnliches Verhalten auf. Der Bereich von null bis zehn Grad ist irrelevant, da Satelliten in dieser Elevation meist durch den Maskierungswinkel ausgeschlossen werden.

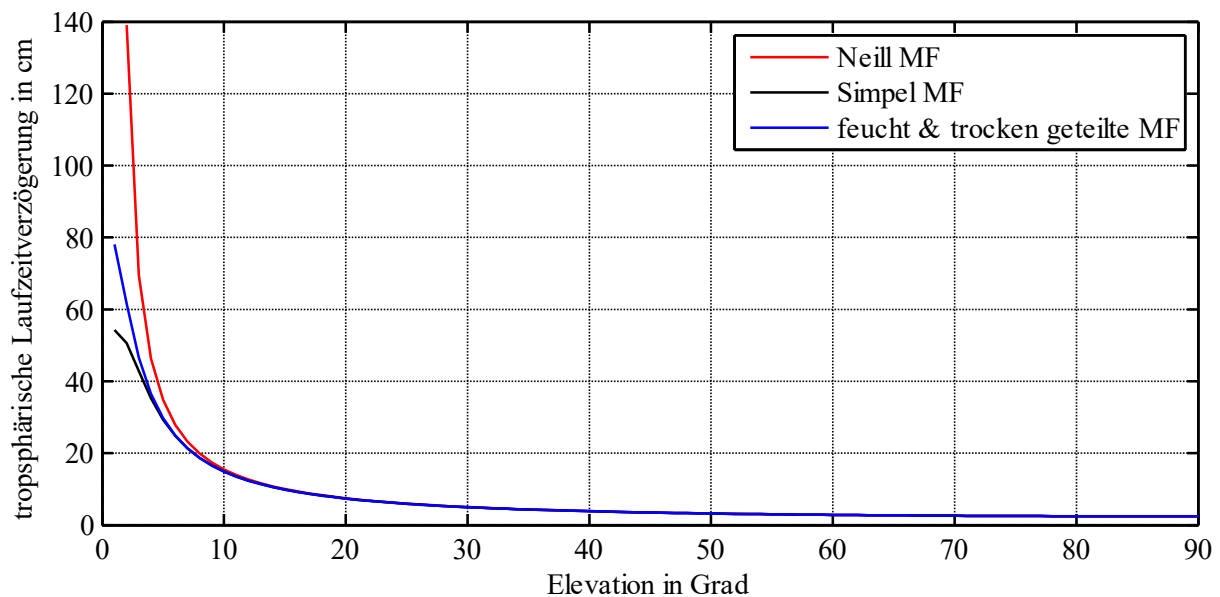


Abbildung 3-2: Troposphärische Laufzeitverlängerung über den Satellitenelevationsgrad für $T = 9,7$ °C, $P = 1001$ mbar, $e = 98.4$ % Luftfeuchte und eine Höhe von $h = 120$ m über dem Referenzellipsoid.

3.8 Signalabschattung

In der Theorie garantieren die GNSS-Systeme die kontinuierliche Verfügbarkeit von mindestens vier Satelliten zu jeder Zeit an jedem Ort auf der Erdoberfläche [vgl. Kaplan/Hegarty 2005]. Durch Bebauungen oder natürliche Einflüsse in der Empfängerumgebung werden Satellitensignale mit einem geringen Elevationswinkel abgeschattet. Diese können folglich durch den GNSS-Empfänger nicht mehr ausgewertet werden.³

3.9 Mehrwegeausbreitung

Die Mehrwegeausbreitung ist eine der zurzeit meist erforschten Einflüsse der satellitenbasierten Ortung. Trifft das Satellitensignal auf dem Weg zur Antenne auf eine reflektierende Fläche, kann es zur spiegelnden oder diffusen Reflexion (exemplarische Darstellung in Abbildung 3-3) kommen. Spiegelnde Reflexionen treten bei glatten Oberflächen wie Fenstern, Häuserwänden oder Wasserflächen auf, wohingegen diffuse Reflexionen auf raue Oberflächen zurückzuführen sind. Die Abschwächung der Signalstärke ist in beiden Fällen abhängig vom Reflexionskoeffizienten des Untergrunds. Der maximale Einfluss von Mehrwegeeffekten auf die Pseudodistanz basiert auf dem Chipping Intervall. Ein Chipping Intervall überdauert ein Zeitintervall von 1 ms, somit ergibt sich eine maximale Pseudodistanzabweichung von 300 m. [vgl. Hofmann-Wellenhof et al. 2003].

³ Wohlwissend, dass Signalabschattung und Mehrwegeausbreitung eine der Haupteinflüsse auf die Genauigkeit im Bodenverkehr sind, wurden sie in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Mehrwegeausbreitungen werden in zwei Kategorien aufgeteilt: Mehrwegeinterferenz mit direkter *Line of Sight* (LOS) und *Non Line Of Sight* (NLOS) Mehrwegeausbreitung. LOS-Mehrwegeinterferenz tritt auf, wenn mehrere Signale des gleichen Satelliten bei der Empfangsantenne mit einer ausreichenden Stärke empfangen werden. Da das direkte Signal stets vor dem reflektierten Signal auftrifft und nur in Ausnahmefällen eine geringere Signalstärke aufweist, werden diese Mehrwegeeffekte vom Empfänger identifiziert und haben keinen Einfluss auf die Genauigkeit. Bei der NLOS Mehrwegeausbreitung hingegen wird der direkte Signalweg geblockt und nur ein reflektiertes Signal wird von der Antenne aufgenommen. Die NLOS-Mehrwegeausbreitungen sind nur schwer anhand der Signalstruktur zu identifizieren [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

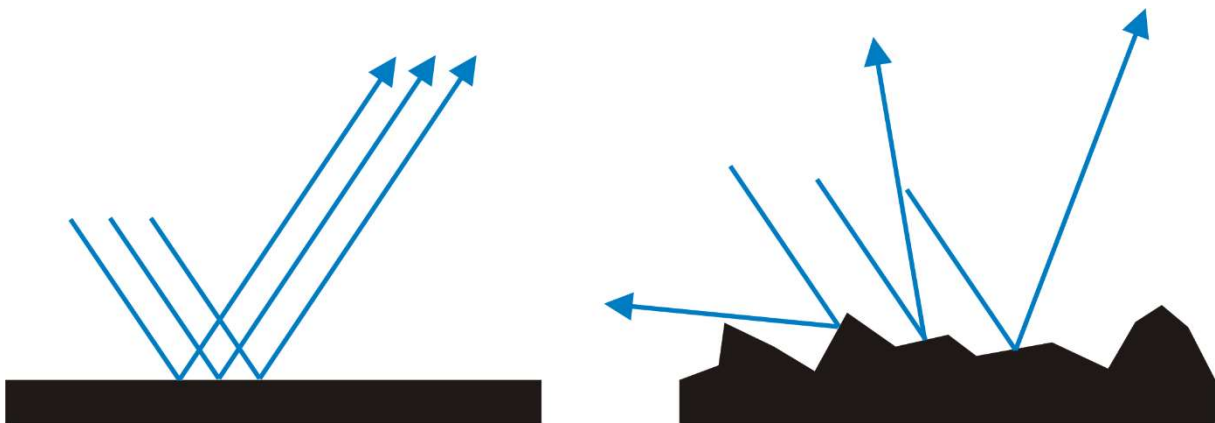


Abbildung 3-3: Verschiedene Ausprägungen von Mehrwegeeffekten; links: spiegelnde Reflexion auf einer glatten Oberfläche; rechts: diffuse Reflexion auf einer rauen Oberfläche

Mehrwegeeffekte können anhand von Simulation auf Basis von hochgenauen Umgebungsmodellen errechnet werden. Da im Folgenden die Annahme getroffen wird, dass Mehrwegeeffekte für den Fall der Autobahnfahrt und der Überlandfahrt nicht auftreten, wird die Quantifizierung der Mehrwegeeffekte an dieser Stelle nicht weiter dargestellt.

3.10 Varianz bei der Messung von satellitenbasierten Ortungssystemen

In Abbildung 3-4 sind die Trajektorien von Messfahrten dreier baugleicher und baureihengleicher GNSS-Empfänger auf einer Achterbahnfahrt aus dem Heidepark Soltau aus dem Jahr 2014 dargestellt.⁴ Die GNSS-Empfänger mit gleicher Konfiguration wurden dabei parallel mit den gleichen Antennensignalen über einen Antennensplitter versorgt. Die dabei aufgezeichneten Trajektorien divergieren stark. Daraus lässt sich schließen, dass eine einzige Messfahrt keinen Aufschluss über die Qualität des Prüfgegenstands unter den gegebenen Messbedingungen ermöglicht. [vgl. Spiegel et al. 2014]

⁴ gleiche Abbildung wie in Unterkapitel 1.2.3.

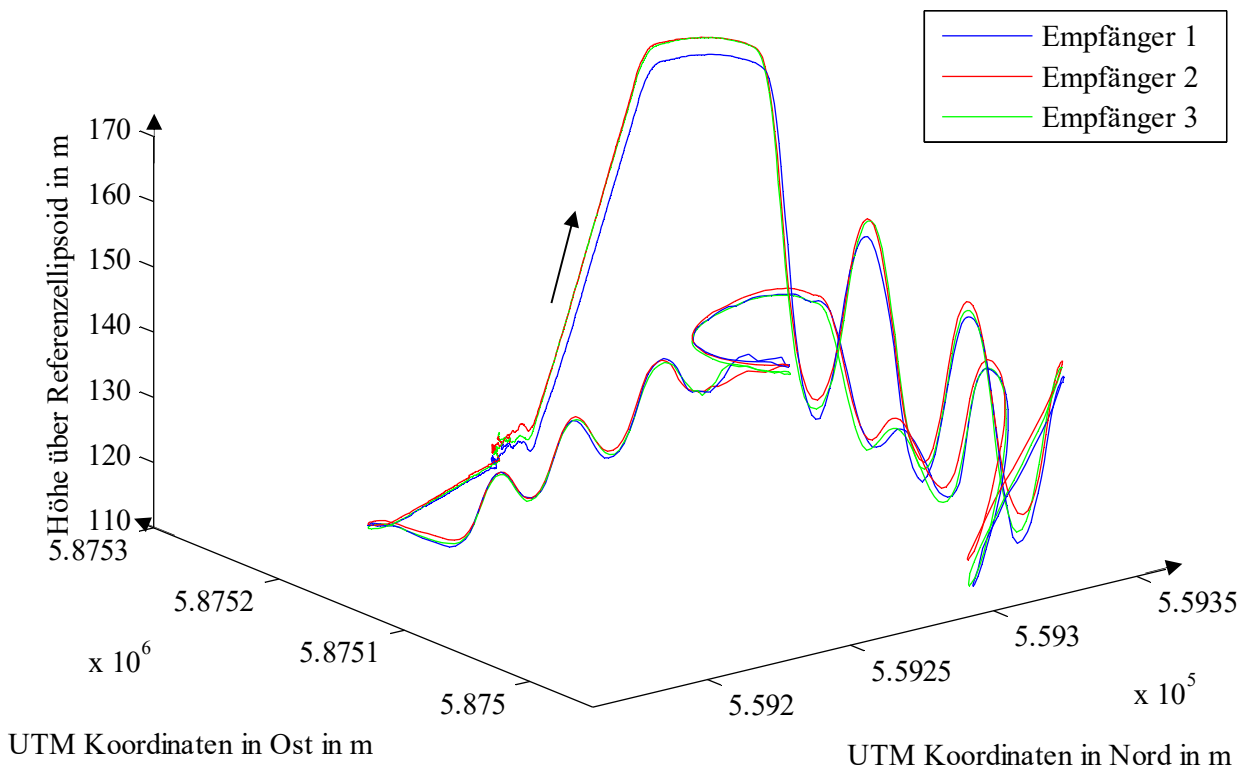


Abbildung 3-4: Unterschiedliche Trajektorien auf einer Achterbahn von GNSS-Empfängern gleicher Bauart- und -reihe bei gleichen Eingangssignalen in Anlehnung an [Spiegel et al. 2014].

In den folgenden Unterkapiteln 3.10.1 bis 3.10.4 wird auf den Ursprung für das stochastische Verhalten von Satellitenempfängern eingegangen und Möglichkeiten aufgezeigt, wie mit diesem Verhalten von Seiten des Prüfsystems umgegangen werden kann.

3.10.1 Empfängerrauschen und Auflösung

Ein Grund für das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern ist das thermische Rauschen. Thermisches Rauschen beschreibt die zufällige Bewegung von Elektronen in elektrischen Komponenten, also Widerständen und Halbleitern in GNSS-Empfängern. Das Rauschen äußert sich in hohen Fluktuationen und Vorzeichenwechseln in der Spannung. Durch die Spannungsschwankungen kommt es zu Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen in den Tracking Loops. Dies äußert sich umso stärker, je stärker die Eingangssignale schwanken [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

Von Chen et al wurde ein Softwareempfänger entwickelt und dessen Sensitivität untersucht. Dafür wurden die aufgezeichneten Satellitensignale mit einem Rauschen überlagert, das mit gleichgroßer Amplitude aber in zufälliger Erscheinung aufgetreten ist. Es zeigt sich, dass für einen Softwareempfänger mit steigendem Rauschen die Phasenabweichung steigt und stärker variiert [vgl. Chen et al. 2015]. Typischerweise ist der Einfluss des Empfängerrauschens und der Auflösung für C/A Code Empfänger im Bereich von einem Dezimeter [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

3.10.2 Empfängeruhrenabweichung

Der Größenwert der Empfängeruhrenabweichung wird während der Bestimmung des Orts als vierte Unbekannte bestimmt. Die Empfängeruhr unterliegt einem stochastischen Rauschen und ist stark von den Umgebungstemperaturen und dem dynamischen Verhalten der Fahrzeugplattform abhängig. Diese Einflüsse führen zu einer erhöhten zufälligen Messabweichung. Nach Petovello hat der Größenwert der Empfängeruhrenabweichung einen Einfluss auf das Messergebnis, da die Uhrenabweichung direkt die Pseudodistanzabweichung hervorruft [vgl. Mark Petovello 2011]. Durch den Einsatz von höherwertigen Empfängeruhren ist es somit wahrscheinlich, dass die Streuung reduziert wird. So werden von Krawinkel und Schön Atomuhren zur Verbesserung der Uhrenmodellierung in der automobilen Anwendung untersucht [vgl. Krawinkel/Schön 2016].

3.10.3 Vergangene Werte als Grundlage für die zukünftige Berechnung

Die meisten Empfänger bieten die Möglichkeit der Filterung bzw. Glättung der Ortstrajektorie durch intelligente Filter und Auswerteverfahren. Das gängigste Verfahren zur Filterung ist das nach Kalman. Der Minimum-Varianz-Schätzer bestimmt auf Basis der Schätztheorie in Zustandsraumdarstellung zukünftige Systemzustände. Während der Filterprädiktion und Korrektur wird auf Schätzwerte vorheriger Filterschritte oder aktueller Messwerte zurückgegriffen. Sind vorherige oder aktuelle Messwerte ungleich, beeinflusst dies die Folgezustände.

3.10.4 Möglichkeiten des Umgangs mit stochastischem Verhalten

Um das stochastische Verhalten der Prüfgegenstände zu untersuchen, bedarf es Messungen unter gleichen Messbedingungen. Dieser Anspruch kollidiert mit den instationären Messbedingungen bei GNSS-Messungen. Dennoch sind verschiedene Prüfsysteme möglich, mit denen das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern untersucht werden kann.

Die nächstliegende Möglichkeit ist der parallele Betrieb mehrerer gleicher GNSS-Empfänger, die mit den gleichen Antennensignalen versorgt werden. In der Praxis stößt dieses Verfahren schnell an seine Grenzen. Auf der einen Seite kosten hoch entwickelte GNSS-Empfänger mehrere tausend Euro und hiervon würde eine Vielzahl gebraucht. Auf der anderen Seite ist bei den Messsystemen die Anzahl der Schnittstellen, an denen Messdaten aufgezeichnet werden können, oft begrenzt und eine Erweiterung, wenn überhaupt möglich, ebenfalls kostenintensiv.

Eine weitere Option, das stochastische Verhalten zu untersuchen, ist mit GNSS-Signalsimulatoren möglich. Simulatoren emulieren Satellitensignale und können diese mit einer hohen Wiederholgenauigkeit abspielen. Der große Vorteil von Simulatoren ist, dass die Signale gezielt manipuliert werden können und somit Prüffälle wie ein Satellitenausfall, fehlerhafte Ephemeriden oder Mehrwegeeffekte gezielt geprüft werden können. Der Nachteil der Simulatoren ist, dass schwierige Umgebungsbedingungen mit

einem hohen Grad an Mehrwegeeffekten bis heute nicht realgetreu in den Signalen abgebildet werden können [vgl. Spirent Communications PLC 2015].

Besser kann das stochastische Verhalten in Umgebungen mit komplexen Mehrwegeeffekten durch Transientenrekorder analysiert werden. Transientenrekorder zeichnen ein Frequenzband während einer Prüffahrt auf und speichern dieses auf Datenträgern im digitalen Format. Im Anschluss an die Prüffahrt können die Signale im Labor einer Trägerfrequenz aufgeprägt und wiederholt abgespielt werden [Richter et al. 2013b]. Durch die Wandlung in digitale Werte und die Quantifizierung kommt es jedoch zu geringen Ungenauigkeiten. In welcher Größenordnung diese sind, ist derzeit Gegenstand der Forschung an verschiedenen Einrichtungen [vgl. Richter et al. 2013b]. Zusätzlich ist es bis heute nicht möglich, die aufgezeichneten Signale so zu manipulieren, dass Spezialfälle und komplexe Umgebungen wiederholt abgespielt werden können. Eine detailliertere Beschreibung von Transientenrekordern ist in Abschnitt 8.1.3 dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung des Prüfgegenstandes sind die Gates (Galileo Test Ranges). Diese wurden zur Entwicklung von Produkten und Technologien gegründet und gefördert. Insgesamt wurden vier Testgebiete, das Rail und Automotive Gate [vgl. Trzuskowsky et al. 2014], Maritime [vgl. Dietz et al. 2007], Aviation und das Berchtesgadener Gate, installiert [vgl. Zweigel et al. 2016]. Eine unterschiedliche Anzahl an Pseudoliten sendet dabei Galileo-Satellitensignale in einem begrenzten Prüffeld. Diese Satellitensignale können frei manipuliert und wiederholt abgespielt werden. Mit großem finanziellen sowie zeitlichen Aufwand wäre es möglich, in den Gates das stochastische Verhalten der GNSS-Empfänger genauer zu untersuchen.

3.11 Messunsicherheit bei der Bestimmung der Einflussgrößen

Sollen nun die wahren Messbedingungen anhand von Referenzwerten und Modellen geschätzt werden, müssen die einzelnen Einflüsse hinsichtlich ihrer Messunsicherheit untersucht werden. Dafür werden erst die Messunsicherheiten der einzelnen Einflüsse und anschließend in der Kombination bestimmt. Die Messunsicherheiten der einzelnen Einflüsse wurden anhand einer Literaturrecherche ermittelt und konservativ ausgewählt. Dies führt zu Messergebnissen, in die ein großes Vertrauen möglich ist, aber auch zu einem vergrößerten Überdeckungsintervall oder -bereich als für die Überlagerungswahrscheinlichkeit notwendig. Die Messunsicherheiten der Einflüsse, in denen die wahren Werte liegen, sind in Tabelle 3-7 mit den geschätzten Größenwerten und den dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Einige Einflüsse sind aufgrund ihres geringen Wertes vernachlässigt worden und werden durch die konservativ gewählten Messunsicherheiten der ionosphärischen und troposphärischen Laufwegverlängerungsschätzung mit abgedeckt.

Tabelle 3-7: Zusammenfassung der Messunsicherheit der Einflüsse für eine 1 Sigma Wahrscheinlichkeit auf der Ebene der Pseudodistanz

Komponente der Pseudodistanz	Messunsicherheit: Größenwert und Dimension	Häufigkeitsverteilung (TypA)
Satellitenorbitabweichung	2,5 cm. [vgl. International GNSS Service 2015]	Normalverteilt
Lagranger Interpolation 11. Ordnung	0,2 cm [vgl. Feng/Zheng 2005]	Normalverteilt
Satellitenuhrenfehler	20 ps (picoseconds) → 6 mm [vgl. International GNSS Service 2015]	Normalverteilt
Ionosphärenabweichung	< 1 % der auftretenden Laufzeitverlängerung [vgl. Hoque/Jakowski]	Normalverteilt
Troposphärenabweichung (ZTD)	1-2 cm [vgl. Misra/Enge 2011]	Normalverteilt
Vernachlässigte Einflüsse für C / A Code Ortsberechnungen		
Erdrotation	1 cm [vgl. Héroux/Kouba 2001]	Normalverteilt
Einfluss durch Tiden	0,33 cm [vgl. Héroux/Kouba 2001]	Normalverteilt
Referenzstationsverschiebung	0,33 cm [vgl. Héroux/Kouba 2001]	Normalverteilt

In dem Verfahren des GUM wird unter Punkt fünf die Bestimmung der kombinierten Standardmessunsicherheit für korrelierte und nicht korrelierte Werte unterschieden. Für den Fall der GNSS-Messung kann von unkorrelierten Eingangsgrößen ausgegangen werden, da die einzelnen Unsicherheitsbeiträge zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf den unterschiedlichen Ebenen wirken. [vgl. Fuhlbrügge 2004].

Das Überdeckungsintervall der Messunsicherheit ist abhängig von den instationären Größen der Anzahl und Orte der sichtbaren Satelliten und der Messunsicherheit, als Relativwert der Laufzeitverzögerung der Ionosphäre. Dies führt dazu, dass die Messunsicherheit zu jedem Messwert neu berechnet werden muss. Sind Änderungsraten gering, ist es möglich die Messunsicherheit durch die Maximalwerte anzugeben. In Abschnitt 6.4 wird das Verfahren zur Berechnung der Messunsicherheit dargestellt und in Abschnitt 8.4.2 auf eine Messung angewendet.

4 Metrologische Anforderungen an die normkonforme sicherheitsrelevante Prüfung

Für Hersteller ist es vorteilhaft, die sicherheitsrelevanten Komponenten oder Funktionen von einem unabhängigen Prüflabor verifizieren und zertifizieren zu lassen (siehe Abschnitt 1.1). Damit die Verifizierungen und folgenden Zertifizierungen beweisfest sind, müssen Prüflabore nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert sein. Die Norm ist in zwei Teile gegliedert.

In dem ersten Teil der Norm werden Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 an den organisatorischen und prozessualen Aufbau des Labors gestellt. Im zweiten Teil wird in generischer Form auf die technischen Anforderungen aus der der DIN EN ISO/IEC 17025 eingegangen, die während der Durchführung von Prüfungen eingehalten werden müssen. Dieser Teil ist für diese Arbeit von Bedeutung. Die DIN EN ISO/IEC 17025 schreibt zusätzlich eine Zertifizierung nach ISO 9001 vor. Die ISO 9001 wird in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Im folgenden Unterkapitel 4.1 werden die Ziele der DIN EN ISO/IEC 17025 untersucht und die technischen Anforderungen in Abschnitt 4.2 extrahiert. Anschließend werden in Abschnitt 4.3 vorhandene Normen, Standards und Richtlinien aus dem Bereich der satellitenbasierten Ortung auf die Dokumentation der Messbedingungen, Berücksichtigung des stochastischen Verhaltens und die Eliminierung von Ausreißern untersucht. Das Kapitel wird durch den Abschnitt 4.4 mit einem Vergleich der Normen, Standards und Richtlinien mit den Anforderungen aus der DIN EN ISO/IEC 17025 abgeschlossen.

4.1 Ziele der DIN EN ISO/IEC 17025

Das Hauptziel der DIN EN ISO/IEC 17025 ist die transparente, glaubwürdige, richtige, vergleichbare und für den Anwender relevante Erhebung von Messdaten, Bestimmung der Messergebnisse und deren Nachvollziehbarkeit. Die Norm definiert in generischer Form Anforderungen an Prüf- und Kalibrierlaboren. [vgl. Bosch/Wloka 2011]

Die eigentlichen Prüfprozeduren werden in anwendungsspezifischen Normen wie z. B. [DIN EN 16803-1] entwickelt oder müssen für neuartige Technologien oder Entwicklungen durch die Hersteller oder Betreiber von Prüflaboratorien geschaffen werden. Eigentlich sollte der Anspruch an die Prüfung auch ohne eine Akkreditierung ein allgemeiner Standard sein, es hat sich jedoch gezeigt, dass die Anforderungen in der Industrie und auch in der Wissenschaft überraschend oft nur teilweise eingehalten werden z. B. [vgl. Mark Petovello 2014]. Die Attribute des Messergebnisses aus DIN EN ISO/IEC 17025 sollen insbesondere sein [Bosch/Wloka 2011, S. 7]:

Glaubwürdigkeit – Neben der Kompetenz der ausführenden Stelle soll als Maß für das Vertrauen in ein Messergebnis jedes Messergebnis um eine Angabe der Messunsicherheit erweitert werden [Bosch/Wloka 2011]. Dieses soll, wie in der Messtechnik üblich, nach dem international anerkannten

Verfahren des GUM geschehen [JCGM 100]. Lediglich in den Fällen, in denen die Messunsicherheit sehr klein im Vergleich zur erwarteten Prüfgröße ist (Faktor 10 geringer als die zu erwartende Messabweichung), darf auf die Angabe der Messunsicherheit verzichtet werden [vgl. GM AR 108].

Richtigkeit und Zuverlässigkeit – Viele Parameter beeinflussen die Richtigkeit und Zuverlässigkeit des Messergebnisses. Einflüsse sind z. B. die Temperatur, Luftfeuchte der Messumgebung. Ein einheitliches Vorgehen mit einer kritischen Hinterfragung des Prozesses, einem konsequenten Monitoring der Umgebungsbedingungen, mit fest definierten statischen Vorgehensweisen bei der Bestimmung der Qualitätsmerkmale und geeigneten Verfahren, um Messfehler zu identifizieren, ist unverzichtbar. Die konkrete Umsetzung und Vorgehensweise liegt dabei im Kompetenzbereich der Prüflaboratorien. [vgl. Bosch/Wloka 2011]

Nachvollziehbare Darstellung – Die Messergebnisse müssen für den Anwender oder Kunden nachvollziehbar dargestellt werden. Dies beinhaltet die eindeutige Definition des Prüfgegenstands, der Prüfgrößen, die Darstellung der Messunsicherheit des Messverfahrens und die Ausprägung der Einflüsse, die das Messergebnis maßgeblich beeinflusst haben (könnten). Ferner sollen die Einflüsse in einer Form dargestellt werden, die direkte Rückschlüsse auf das Messergebnis ermöglicht. [vgl. Bosch/Wloka 2011]

Vergleichbarkeit – Durch verschriftlichte Prüfvorschriften und eindeutig definierte Messbedingungen soll es möglich sein, dass unterschiedliche Prüflabore zu vergleichbaren Messergebnissen kommen. Dabei sollen die Messergebnisse unabhängig von den ausgewählten Messverfahren und den an der Prüfung beteiligten Mitarbeitern sein. [vgl. Bosch/Wloka 2011]

Anwenderrelevanz – Die im Auftrag des Kunden durchgeführten Prüfungen sollen für den Kunden relevante Informationen liefern. Dies bedeutet, dass die Auswahl der zu untersuchenden Prüfgrößen oder des gewählten Referenzmessverfahrens durch den Kunden in Absprache mit dem Prüflabor getroffen werden kann. [vgl. Bosch/Wloka 2011].

4.2 Technische Anforderungen aus der DIN EN ISO/IEC 17025

Um die grundsätzlichen Anforderungen aus Kapitel 4.1 zu erfüllen, muss ein Prüfprozess von der Handhabung bis hin zur Auswertung fehlerfrei abgearbeitet werden. Dies umfasst insbesondere die Berücksichtigung der menschlichen Einflüsse, der Umgebungsbedingungen, der Messverfahren und der dazugehörigen Validierung, der Probenentnahme und die messtechnische Rückführung [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025]. In Abbildung 4-1 ist ein typischer Messdatenfluss dargestellt. Die dazugehörigen Anforderungen der Einzelschritte sind darunter zusammengestellt. Zusätzlich gelten für den gesamten Verlauf die Anforderungen über alle Arbeitsschritte.

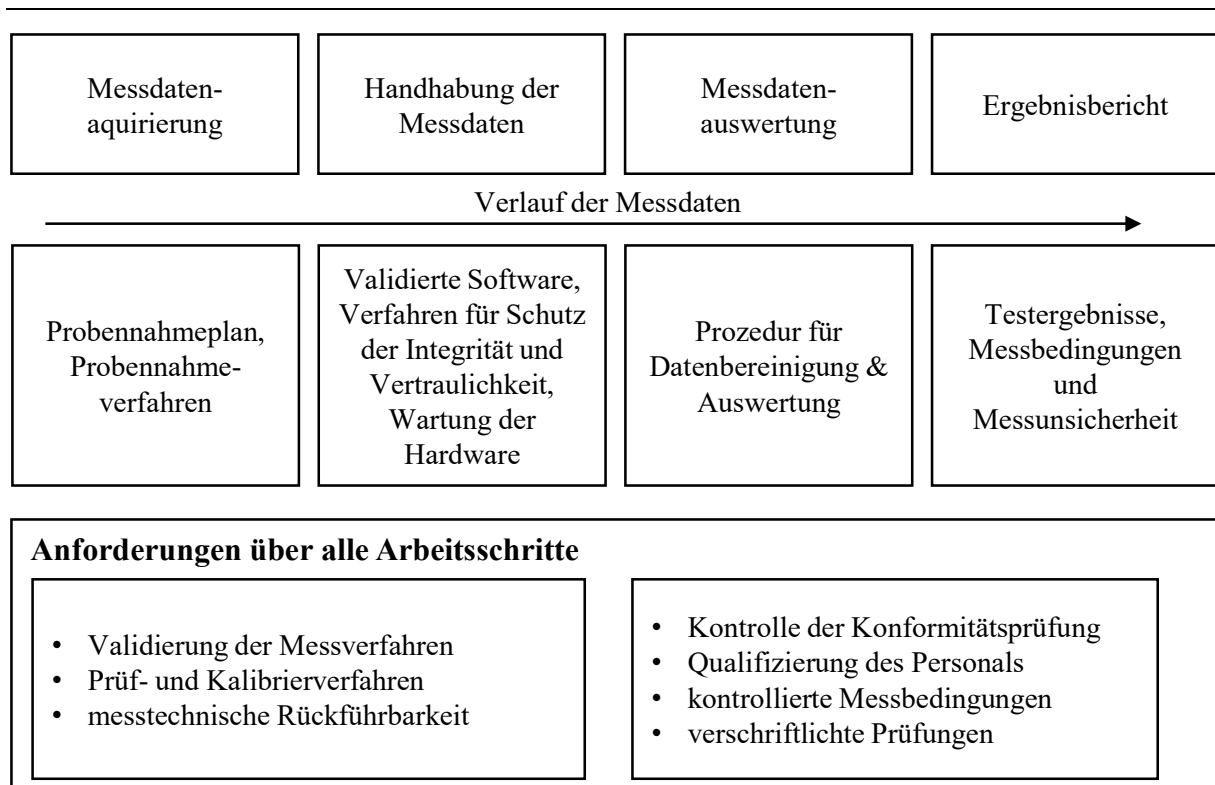


Abbildung 4-1: Messdatenfluss und Anforderungen an die einzelnen Schritte. Die Aufbewahrung bzw. Zerstörung der Messdaten ist für den Fall der satellitenbasierten Ortung vernachlässigt.

Die folgenden Unterkapitel zeigen die Besonderheiten der technischen Anforderungen hinsichtlich der Qualifizierung satellitenbasierter Ortungssysteme auf. Einzelne Schritte, die nicht ortungsspezifisch sind, wie z. B. das Validieren der für die Auswertung genutzten Software, werden in dieser Arbeit nicht dargestellt. Die Besonderheiten im Kontext von satellitenbasierten Ortungssystemen sind bei dem Probennahmeplan, der Prozedur für Datenbereinigung und Auswertung, dem Ergebnisbericht, der messtechnischen Rückführung und den kontrollierten Messbedingungen zu finden.

4.2.1 Probennahmeplan

Der Probennahmeplan beinhaltet ein Verfahren zur Erhebung von Messdaten oder dem zu untersuchenden Material. In dem Probennahmeplan werden die Messbedingungen festgeschrieben, unter denen die Proben entnommen bzw. genommen werden sollen.

Im Kontext der satellitenbasierten Ortung können durch die instationären Messbedingungen beim Prüfen mit realen Signalen keine einzelnen Reaktionen des Prüfgegenstands auf bestimmte Einflüsse gezielt untersucht werden, es können lediglich Messumgebungen definiert werden, in denen eine hohe Auftrittswahrscheinlichkeit verschiedener Einflüsse herrscht. Dazu kommt, dass zu jedem Prüffall eine Strategie zum Start und Ende der Messung bzw. des Prüffalls gehört.

4.2.2 Datenbereinigung und Auswerteverfahren

In der DIN EN ISO/IEC 17025 wird ein dokumentierter Prozess verlangt, in dem die Bestimmung der Qualitätsmaße und Bereinigung der Messdaten festgelegt werden. Daher sollte in der Prüfprozedur dargestellt werden, wie, wo, wann und unter welchen Umständen ein Prüfscenario beginnt und endet. Ferner fordert die Norm eine Strategie, wie mit Messwerten mit groben Messabweichungen umgegangen wird und nach welchen Verfahren Ausreißer identifiziert und eliminiert werden sollen. Zuletzt verlangt die Norm die genaue Definition und Beschreibung der Prüfgrößen.

In dem GUM wird beschrieben, dass die versprachlichte Form der Messgröße stets Interpretationsspielraum bietet. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine mathematische Definition vorgezogen. [vgl. JCGM 100].

4.2.3 Messbedingungen und Räumlichkeiten

In der DIN EN ISO/IEC 17025 wird gefordert, dass Prüfungen in Umgebungsverhältnissen durchgeführt werden müssen, die das Messergebnis nicht maßgeblich verfälschen oder die geforderte Messung nicht zum Negativen oder zum Positiven verbessern. Für die Prüfung sollen, wenn ein Einfluss auf das Messergebnis herrscht, die Umgebungsbedingungen überwacht, wenn möglich geregelt und aufgezeichnet werden. [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025].

Für die Prüfung von satellitenbasierten Ortungssystemen bedeutet dies, dass Messungen nur in geregelten Messumgebungen durchgeführt werden können, wenn die Prüfgegenstände anhand von künstlich erzeugten Signalen aus Simulatoren getestet werden. Insbesondere für komplexe Messumgebungen ist dies bis heute noch nicht möglich. So können beispielsweise Waldfahrten nicht mit aktuellen Simulatoren simuliert werden [vgl. Spirent Communications PLC 2015].

Sollen Messungen mit realen Signalen unter wirklichen Messbedingungen durchgeführt werden, muss auf eine andere Vorgehensweise zurückgegriffen werden, damit die Messbedingungen dokumentiert werden können. Eine ähnlich komplexe Thematik liegt bei der Messung des Bremsweges bei ABS-Bremsungen vor. Dort ist die Messung u. a. von Temperatur-, Luft-, Wind- und Straßenbedingungen und der Kinematik des Prüfgegenstands abhängig. Den Einflüssen der Luft und Temperatur werden zulässige Intervalle zugewiesen und weitere Einflüsse sind in dem Reibwert gebündelt. Dem Reibwert wird wiederum ein Mindestwert zugewiesen, der eingehalten werden muss. Sollen Messungen verglichen werden, müssen diese auf derselben Strecke und etwa gleichen Witterungs- und Umweltbedingungen durchgeführt werden [vgl. DIN 70028].

Ein ähnliches Vorgehen ist in den NCAP AEB Vergleichstests zu identifizieren. Die Umgebungsbedingungen werden in einem Intervall festgelegt, die Sichtweite mit min. 1 km und die Helligkeit mit min.

2000 Lux bestimmt. Zusätzlich sollen die Luft- und Streckentemperatur, Windgeschwindigkeit und Helligkeit bei jedem Test oder mindestens alle 30 min dokumentiert werden [vgl. European New Car Assessment Programme 2015].

Im Kontext von GNSS-Messungen können bis heute nicht alle Einflüsse quantifiziert werden. Messungen können in drei verschiedene Stufen kategorisiert werden:

- Messungen in Umgebungen, die genau modelliert werden können, z. B. Messungen unter offenem Himmel.
- Messungen in komplexen Messbedingungen, die nur ungenügend modelliert werden können, z. B. eine Fahrt durch einen nassen Wald.
- Messungen durch Simulatoren zur Prüfung von speziellen seltenen Prüffällen, die in der Realität nicht geprüft werden können, z. B. ein Satellitenausfall.

In der vorliegenden Arbeit wird auf die Stufe der Messungen in Umgebungen, die modelliert werden können, weiter eingegangen. Die Dokumentation der Umgebungsbedingungen kann

- anhand eines quasi deterministisch arbeitenden Empfängers ermöglicht werden. Dieser ist derzeit Forschungsschwerpunkt an verschiedenen Forschungseinrichtungen, oder
- anhand der Berechnung der Einflüsse auf die einzelnen Satellitensignale auf Basis von alternativen Messprinzipien. Bei komplexen Messungen kann dies zur besseren Nachvollziehbarkeit in einer Größe erfolgen.

4.2.4 Messtechnische Rückführung

Die Norm DIN EN ISO/IEC 17025 verlangt für jedes Messinstrument die messtechnische Rückführung. Die messtechnische Rückführung beschreibt den Vorgang, in dem auf einer oder mehreren Stufen eine Messgröße mit einem nationalen Normal verglichen wird. Auf jeder Stufe wird eine Kalibrierung anhand eines Normals durchgeführt. In Abhängigkeit von den Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit der Referenz sollen individuelle, unabhängige Kalibrierprogramme erstellt und durchgeführt werden. Dabei soll das Intervall zwischen zwei Kalibrierungen die vom Hersteller maximal empfohlenen Intervalle nicht überschreiten. Normalerweise muss das Messgerät nach jedem Ausschalten oder Umjustieren neu kalibriert werden [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025].

Die Kalibrierung soll dabei auf SI-Einheiten zurückgeführt werden. Ist keine Rückführung auf SI-Einheiten möglich, muss die Kalibrierung das Vertrauen in das Messsystem auf anderem Wege erzeugen, indem eine Rückführung auf alternative, geeignete Normale hergestellt wird [vgl. Bosch/Wloka 2011].

Im Kontext von GNSS-Referenzmesssystemen führt die Dynamik im System zu erhöhter Komplexität, da ein sich bewegendes Fahrzeug nicht einfach auf eine Referenzkoordinate wie bei geodätischen Kalibrierungen für Prüfgegenstände in der ISO 17123-8 gestellt werden kann [vgl. ISO 17123-8]. Die messtechnische Rückführung für ein Referenzmesssystem kann erfolgen durch:

- eine Bahn, ausgestattet mit absolut referenzierten Identifizierungskennzeichen, wie z. B. den Reflektoren im Heidepark Soltau oder auf der hohen Tatra (mit genauer Führung in Lateral- und Longitudinalrichtung), oder die in der Fahrbahn versenkten Magnete auf der PTB-Teststrecke (longitudinal Führung), wie von Wegener und Schnieder dargestellt [vgl. Spiegel et al. 2014; Wegener/Schnieder 2012; Poliak 2009].
- ein Fahrzeug das strikt die gleiche Trajektorie einhält (wobei an dieser Stelle die Güte der Regelung offen ist), wie z. B. das geregelte Fahrzeug des Instituts für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [vgl. Institut für Verkehrssystemtechnik 2016].
- Plausibilitätsprüfungen mit einem Abgleich von Trajektorien und Erdabbildungen, wie z. B. Google Earth. Hier kann beispielsweise das Vor- und Zurückfahren auf den gleichen Ausgangspunkt verwendet werden. Systematische Abweichungen können hierdurch jedoch nicht identifiziert werden.

4.2.5 Betrachtung der Messunsicherheit

Um die Glaubwürdigkeit des Messergebnisses zu erhöhen, verlangt die DIN EN ISO/IEC 17025 die Angabe der Messunsicherheit für das Referenzmesssystem. Um eine eindeutige Rückführbarkeit zu ermöglichen, wird erwartet, dass das Referenzmesssystem hinsichtlich seiner Messqualität zertifiziert ist und jedem Referenzwert eine Messunsicherheit beigeordnet ist. Die Messunsicherheit kann alternativ in Form eines absoluten Bereichs der zurückgelegten Wegstrecke)⁵ (z. B. $\pm 2\text{ °C}$ (95 % Wahrscheinlichkeit)) oder relativ (z. B. 1 % (95 % Wahrscheinlichkeit) für einen Referenzmesswert angegeben werden.

Es ist üblich, dass, soweit möglich, das Referenzmesssystem nicht auf dem gleichen Messprinzip wie der Prüfgegenstand basiert, um „Common-Cause-Fehler“ zu vermeiden. Darüber hinaus gilt, dass, soweit möglich, die Genauigkeit des Referenzmesssystems eine Größenordnung präziser sein soll als die zu erwartende Genauigkeit des Prüfgegenstands [vgl. GM AR 108].

Die Messunsicherheit des Referenzmesssystems ist in der Regel kein Bestandteil von Normen und Standards zur Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen, da ein geeignetes Referenzmesssystem mit Messunsicherheitsangabe als gegeben angenommen wird. Das allgemeine Verfahren des GUM ist für zeitinvariante Messsysteme entwickelt worden. Im Kontext der GNSS-Messungen sind die Messgrößen zeitvariant. Aus diesem Grund wurde von Wegener das Verfahren auf zeitvariante Messungen erweitert [vgl. Wegener 2013].

⁵ Zum eindeutigen Verständnis muss zusätzlich zur Wahrscheinlichkeit die Wahrscheinlichkeitsverteilung, meist eine Normalverteilung, angegeben werden.

4.3 Vergleich der normativen Anforderungen mit existierenden Standards und Normen

In der Normung, Wissenschaft und Industrie sind diverse Prüfprozeduren vorhanden, die sich mit der Qualifizierung, Verifizierung und Zertifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen befassen. Diese werden im Folgenden in strukturierter Form dargestellt. Es wird jeweils mit dem intendierten Zweck des Dokuments begonnen. Anschließend werden die Dokumente auf die Anforderungen hinsichtlich der:

- Definition des Prüfgegenstands,
- eindeutigen Formulierung der Qualitätsmaße,
- Berücksichtigung des stochastischen Verhaltens der Prüfgegenstände und
- Analyse und Dokumentation der Messbedingungen

untersucht. Dabei wird in strukturelle Messbedingungen und reale Messbedingungen unterschieden. Strukturelle Messbedingungen bleiben über die Zeit annähernd konstant (z. B. Abschattungen durch Häuser), wohingegen die realen Messbedingungen sich mit den Einflüssen auf das Messsignal beschäftigen (z. B. Satellitenuhrenfehler).

4.3.1 DIN EN 61108 – Maritime Navigation and Radiocommunication

Die EN 61108 wurde im Rahmen des CEN entwickelt und beinhaltet in vier Teilen für verschiedene GNSS-Empfängertypen Definitionen der Qualitätsanforderungen, Prüfverfahren und geforderte Prüfergebnisse für die Navigation in der Marine [vgl. IEC 61108-1].

Der Prüfgegenstand ist in dieser Norm relativ frei definiert. Er besteht aus einem GNSS-Empfänger, einer Antenne, einer Schnittstelle zur Datenkontrolle und einer weiteren Schnittstelle, um die Ortsdaten bereitzustellen.

Das stochastische Verhalten einzelner Empfänger wird nicht untersucht. Weder verlangt der Standard, unterschiedliche GNSS-Empfänger zu prüfen, noch die gleichen Prüffälle mehrfach abzuspielen. [vgl. IEC 61108-1].

Die Messbedingungen werden in zwei Ebenen eingeteilt. Auf der strukturellen Ebene soll sichergestellt werden, dass die horizontale uneingeschränkte Empfangbarkeit der Satellitensignale bis zu einem Maskierungswinkel von 5° gewährleistet ist. Auf der Ebene der Messbedingungen werden in der EN 61108 maximale HDOP und PDOP Werte definiert. Werden diese DOP-Werte ($HDOP > 2$ und $PDOP > 3.5$) überschritten, soll die Prüfung pausiert werden, bis die geforderten Grenzwerte wieder eingehalten werden. Zusätzlich werden Grenzwerte für ein Temperaturintervall und die relative Luftfeuchtigkeit definiert. Können diese Grenzwerte nicht eingehalten werden, sollen die gemessenen Werte auf dem Prüfbericht dokumentiert werden [vgl. IEC 61108-1].

4.3.2 DIN EN 16803-1 - Anwendung von GNSS-basierter Ortung für Intelligente Transportsysteme

Die DIN EN 16803-1 ist der erste von drei Teilen zur Ermittlung der Qualität und Verifikation satellitenbasierter intelligenter Transportsysteme (ITS) im Straßenverkehr. Die Norm wurde auf europäischer Ebene beim CENELEC entwickelt und steht zum Zeitpunkt des Schreibens dieser Arbeit als Entwurfsnorm bereit [vgl. DIN EN 16803-1].

In diesem Standard wird der Prüfgegenstand als eine Einheit aus mindestens einem GNSS-Empfänger und der ITS-Anwendung definiert. Dieser Prüfgegenstand umfasst daher das Gesamtsystem. Das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern wird bei der Qualifizierung nicht berücksichtigt. In einer angehängten Sensitivitätsanalyse werden die Ortsinformationen über ein komplexes Verfahren so manipuliert, dass der Einfluss größerer Messabweichungen der Ortsinformationen auf das Gesamtsystem untersucht werden kann [vgl. DIN EN 16803-1].

Das Verfahren der Klassifikation und Charakterisierung der Messbedingungen ist in einem zweistufigen Prozess etabliert. In einem ersten Schritt werden die strukturellen Messbedingungen in sechs Kategorien unterteilt (Land bis hin zur modernen Großstadt). Dabei werden die Kategorien anhand des Maskierungswinkels, der geschätzten Höhe von Gebäuden (mittel bis hoch), der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mehrwegeeffekten (mittel bis hoch) und der Eigenschaften der Gebäudeoberflächen ausgewählt. In einem weiteren Schritt wird anschließend während der Prüffahrt ein hochsensitiver GNSS-Empfänger zur Dokumentation der Messbedingungen mitgeführt. Die Messfahrten sollen anhand der Ortsrichtigkeit des Empfängers zur Dokumentation der Messbedingungen verglichen werden können, sofern die Abweichungen zwischen den Ortsrichtigkeiten geringer als 20 % für ein gleiches Messszenario sind. [vgl. DIN EN 16803-1].

4.3.3 ETSI TR 101593 – GNSS based location systems – Minimum Performances and Features

Der Standard ETSI TR 101593 definiert Qualitätsmerkmale von ITS Systemen, die auf GNSS-Empfängern basieren und mit einem zentralen Server über ein Kommunikationssystem kommunizieren. In dem Dokument werden zusätzlich einfache GNSS-Empfänger und fusionierte Systeme als mögliche Prüfgegenstände genannt [vgl. ETSI TS 103 246-5].

In dem Standard werden verschiedene Qualitätsmaße definiert. Die Genauigkeit wird anhand der horizontalen Abweichung (RMS) beziffert, bei der Integrität wird auf die Definitionen aus der [DO-229-D] zurückgegriffen. Das stochastische Verhalten von GNSS-Empfängern ist in dem Standard nicht berücksichtigt. Ebenso geht der Standard nicht auf die Anzahl der Vergleichsfahrten und der Länge der einzelnen Prüffälle ein.

Hinsichtlich der Messbedingungen unterteilt die Norm in acht verschiedene Messumgebungen, wobei die einzelnen Prüffälle hinsichtlich des Elevationsmaskierungswinkels, der zu erwartenden Mehrwegeeffekte, der Signalschwächung, der Signalüberlagerung und des dynamischen Verhaltens des Nutzers charakterisiert sind. Darüber hinaus werden verschiedene Prüfmittel untersucht, das Prüfen in realer Umgebung wird jedoch als einziges Verfahren aufgrund der geforderten Anwendungsnähe vorgeschlagen. [vgl. ETSI TS 103 246-5]

4.3.4 ION STD 101 - Recommended Test Procedures for GPS Receivers

Dieser Standard, entwickelt unter Führung der Institutes of Navigation (ION), ist der wohl älteste Standard im Kontext der GPS-Empfänger-Qualifizierung. In dem Dokument werden für verschiedene Qualitätsmaße Prüfprozeduren festgeschrieben [vgl. ION STD 101].

Der Prüfgegenstand wird als ein GPS-Empfänger definiert, jedoch wird im weiteren Verlauf des Dokuments auch das Prüfen von DGPS-Empfängern beschrieben. Die Prüfgrößen werden in mathematischer Form dargestellt und sind eindeutig. Bei den dynamischen Prüfungen wird die Ortsgenauigkeit in Form des 95. Perzentiles kombiniert mit der minimalen und maximalen Ortsabweichung dargestellt. Eine Bereinigung der Stichprobe um grobe Abweichungen ist nicht vorgesehen.

Die dynamischen Prüfungen sollen zu mindestens drei unterschiedlichen Tageszeiten mit einer Dauer von jeweils mindestens einer Stunde stattfinden, dabei sollen während jeder Prüffahrt mindestens 1000 verfügbare Messdaten erhoben werden. Das stochastische Verhalten wird in dem Standard nicht besonders thematisiert. Durch die Stichprobengröße kann ein Anteil des stochastischen Verhaltens jedoch kompensiert werden.

Die Messbedingungen werden auf der strukturellen Ebene in der Form definiert, dass keine Hindernisse die Satellitensignale beeinflussen, deren Satelliten mindestens 10° über dem Horizont stehen. Auf der Ebene der realen Messbedingungen wurden in der ION STD 101 ein maximaler HDOP (vier für zweidimensionale Messungen) und PDOP (sechs für dreidimensionale Messungen) als Grenzwert definiert. Werden diese Grenzen überschritten, soll die Prüfung pausiert werden, bis der Grenzwert wieder eingehalten wird.

Der Standard schreibt die Dokumentation der Kinetik des Prüfträgers während der Messungen vor. Diese sollen in Form der mittleren und maximalen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Drehwinkelbeschleunigung dokumentiert werden.

4.3.5 ISO 17123-8(E) – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments - Part 8: GNSS Field Measurement Systems in Real-Time Kinematic (RTK)

Der Part 8 der Entwurfsnorm ISO 17123 zur Feldprüfung von geodätischen Instrumenten zur Vermessung beschreibt den Messaufbau, die Prüfdurchführung und die Auswertung der Qualitätsmaße von geodätischen GNSS-Empfängern in RTK-Anwendungen. [vgl. ISO 17123-8].

Dabei empfiehlt die Norm das Prüfen mehrerer Prüfgegenstände aus der gleichen Baureihe, sofern möglich. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Fertigungsqualität. Um verschiedene Messbedingungen zu berücksichtigen, werden drei Sets mit jeweils fünf Messungen an zwei verschiedenen geodätisch referenzierten Messorten durchgeführt. Zwischen den einzelnen Sets ist ein Zeitintervall von mindestens 90 min einzuhalten, bis eine erneute Vergleichsmessung durchgeführt werden soll.

Die realen Messbedingungen werden in diesem Standard durch minimale Anforderungen des Herstellers festgelegt. Schreibt der Hersteller in der Dokumentation, dass für eine Bestimmung des Orts bestimmte Voraussetzungen vorliegen (z. B. eine Mindestanzahl sichtbarer Satelliten, ein maximaler PDOP, ...), sollen diese eingehalten werden.

4.3.6 JRC 51300 – Area Measurement Validation Scheme

Der Standard 51300 des Joint Research Centers (JRC) der Europäischen Kommission dient als Prüfvorschrift für Verifizierung und Zertifizierung geodätischer Instrumente zur Vermessung von Feldgrößen unter Mithilfe von satellitenbasierten Ortungssystemen [vgl. JRC TN 51300].

Diese Richtlinie legt Wert darauf, dass der Prüfgegenstand auch in Messumgebungen, in denen schlechter Signalempfang zu erwarten ist, geprüft wird. Messumgebungen mit schlechtem Signalempfang werden in der Richtlinie nicht näher spezifiziert. Auch welchen Anteil die Messumgebungen mit schlechtem Signalempfang an der Länge der Prüftrajektorie haben sollen, wird nicht näher beziffert. Darüber hinaus wird festgehalten, dass die Messungen zu gleichen (möglichst schnell hintereinander) und zusätzlich verschiedenen Satellitenkonstellationen durchgeführt werden sollen.

Verschiedene Prüfgrößen werden in dem Standard sprachlich definiert. Besonders hervorzuheben ist, dass Vergleichbarkeit und Wiederholgenauigkeit beide in Form eines Streumaßes dargestellt werden.

Im Hinblick auf die Streuung gleicher Prüfgegenstände der gleichen Baureihe sollen, wenn möglich, drei Prüfgegenstände aus der gleichen Baureihe von drei unterschiedlichen Bedienern getestet werden.

Kritisch in diesem Standard ist die Ausreißer-Identifikation zu betrachten. Unter Mithilfe einer Varianzanalyse sollen Ausreißer identifiziert werden. Messwerte, die einen zu großen Einfluss auf die Ortsrichtigkeit und Ortspräzision haben, dürfen bis zu einer maximalen Anzahl von 2/9 der Stichprobengröße ausgeschlossen werden. Es kann also fast jeder dritte Wert, der einen zu großen Einfluss auf das Messergebnis besitzt, ausgeschlossen werden. Dies führt dazu, dass die Messergebnisse kontinuierlich als zu gut gewertet werden. Wird beispielsweise die Standardabweichung einer Stichprobe vor und nach einer Ausreißer-Eliminierung bestimmt, zeigt sich, dass die Standardabweichung nach der Ausreißer-Eliminierung kleiner ist und somit die Wahrscheinlichkeit eines präzisen Messwerts steigt.

4.3.7 RTCA DO-229 – MOPS for GPS/WAAS Airborne Equipment

In den „Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment“ werden die minimalen Anforderungen an die Messqualität von SBAS gestützten GNSS-Empfängern für den Einsatz in der zivilen Luftfahrt definiert. Zusätzlich werden in dem Dokument verschiedene Prüffälle dargestellt, auf die das System nach bestimmten Regeln reagieren muss [vgl. DO-229-D].

Die RTCA DO-229 spezifiziert die Qualitätsmaße im Einklang mit der SIS-Spezifikation und Anforderungen an diese [vgl. U. S. Department of Defense 1995]. Eine Eliminierung von groben Messabweichungen findet nicht statt. Das stochastische Verhalten der Prüfgegenstände soll durch die Wiederholung von Prüffällen abgedeckt werden.

Die nötige Stichprobengröße wird für die Warm- und Kaltstartakquisition (siehe Qualitätsmerkmale in 5.5.1) anhand des Standardvorgehens zur Bestimmung des Konfidenzintervalls mit der Annahme einer zugrunde liegenden Binominalverteilung ermittelt. Dabei bezieht sich die Stichprobengröße auf die Wahrscheinlichkeit, dass das System die Anforderungen erfüllt.

In dem Dokument werden verschiedene Messbedingungen und Gefährdungssituationen (Satellitenausfall und Bahnabweichungen) dargestellt, wobei ausgehend von Simulationen mögliche Fehlerquellen oder Ephemeridenabweichungen definiert werden. Die traditionell fortschrittliche Luftfahrt befasst sich mit der Beschreibung der Messbedingungen wenig. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die strukturellen Messbedingungen bis jetzt nicht von Interesse waren, da während der Reise- und Anflugphase diese nicht von Bedeutung sind. Bei der Zulassung von Ortungssystemen in der Luftfahrt wird bei der Betrachtung der Messbedingungen auf die Pseudodistanzabweichungen durch die Satelliten und mögliche Signalüberlagerungen eingegangen [vgl. U.S. Department of Transportation 2012].

4.3.8 Weitere Literatur

Neben den Normen, Standards und Richtlinien gibt es zahlreiche Dokumente, die sich mit der Prüfung von satellitenbasierten Ortungssystemen befassen. In der Dissertation von Hodon werden einzelne Prüffahrten in die Kategorien urbane Umgebung, bewaldete und offene Messumgebung kategorisiert. Dabei ist eine urbane Umgebung definiert als eine Straße mit Gebäuden im Abstand von bis zu 30 Metern. Ähnlich wird mit bewaldeter Umgebung umgegangen. Eine Straße gilt als bewaldet, wenn Bäume in einer Entfernung von bis zur 40 Metern zur Straße stehen. Wie ein Szenario benannt wird, wenn Bäume und Gebäude im geforderten Abstand zur Straße stehen, ist nicht weiter erörtert [vgl. Hodon 2013].

Ein weiterer Versuch, die Messbedingungen zu beschreiben, erfolgt anhand des prozentualen Anteils der sichtbaren Hemisphäre. Hier wird ausgehend vom Antennenzentrum eine imaginäre Halbkugel aufgespannt und jegliche verdeckten Flächen herausgeschnitten. Die Anzahl der sichtbaren Satelliten oder

deren Orbitabweichungen werden nicht berücksichtigt. Ob diese Flächen überhaupt einen Zusammenhang mit dem Messergebnis aufweisen, wird in dem Dokument nicht untersucht. [vgl. Ali et al. 2012].

Darüber hinaus wurde im FP 7 Projekt QualiSaR das Programm QualiSIM entwickelt, welches die Messbedingungen zum Zeitpunkt der Messungen abschätzt. Dieses Programm wurde bis heute jedoch nicht verifiziert [Jakobsen et al. 2013].

4.4 Bewertung der Prüfprozeduren und Hilfsmittel

Die in Kapitel 4.3 dargestellten Normen, Standards und Richtlinien sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst und hinsichtlich der Art der Definition der Qualitätsmerkmale, Spezifizierung der Messbedingungen und des stochastischen Verhaltens bewertet.

Tabelle 4-1: Merkmalsvergleich von Normen, Standards und Richtlinien für die Qualitätsermittlung satellitenbasierter Ortungssysteme

Dokument	Art der Definition der Qualitätsmerkmale	Spezifizierung der Messbedingungen	Stochastisches Verhalten
EN 61108-3:2010	sprachlich	freie Sicht des Horizonts (5°) maximaler DOP-Wert, Luftfeuchtigkeit und Temperatur	nicht berücksichtigt
EN 16803-1 (Draft)	sprachlich	sechs verschiedene Kategorien anhand verschiedener Merkmale Ein Referenzempfänger wird mitgeführt, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen	nicht berücksichtigt
ETSI TR 101593 (Entwurf)	sprachlich	limitiert	nicht berücksichtigt
ION STD 101	mathematisch	freie Sicht des Horizonts (10°) maximaler HDOP und PDOP-Wert	nicht berücksichtigt
ISO 17123-8	mathematisch	nicht spezifiziert	wird in Form von Wiederholungen berücksichtigt
JRC 51300	sprachlich	Elemente, die Satellitensignale stören, sollten in die Prüfung eingebracht werden.	
RTCA DO 229	mathematisch	Verschiedene Prüffälle sind spezifiziert. Maskierungswinkel > 5°	

Die dargestellten Prüfprozeduren haben Unschärfen und erfüllen nicht alle Anforderungen bezüglich der DIN EN ISO 17025. Einige dieser Unschärfen resultieren aus dem Anwendungsspektrum der Norm, andere aus der Zusammensetzung der Normungsgremien, die oft nur mit Ingenieuren auf der Entwicklungsebene und Systemebene besetzt sind. Prüfprozeduren im Bereich der Qualifizierung satellitenbasierter Ortungssysteme benötigen jedoch die Kompetenzen aus den Bereichen der Metrologie, Statistik, Terminologie und Geodäsie. Es lässt sich konstatieren, dass:

- keine eindeutige Terminologie verwendet wird. In der Norm EN 16803-1 werden beispielsweise die Termini „Ground Truth“ und „Referencetrajektorie“ synonym benutzt, obwohl diese in EN 16803-1 eine divergierende Bedeutung haben [vgl. DIN EN 16803-1].
- die Qualitätsmerkmale, anhand derer die satellitenbasierten Ortungssysteme bewertet werden, nicht eindeutig definiert sind. Es werden verschiedene Qualitätsmerkmale beziffert, die für die Verifikation genutzt werden sollen. Es fehlen jedoch eindeutige Rechenvorschriften, um diese zu berechnen. Insbesondere im Bereich der Ausreißerelimination sind differente Interpretationen möglich.
- die Messbedingungen in den Normen nur unzureichend berücksichtigt werden. Lediglich in der EN 16803-1 werden die Messbedingungen mittels eines GNSS-Referenzempfängers dokumentiert. Dabei werden das stochastische Verhalten und der Einfluss der Technologie und Filterung des GNSS-Referenzempfängers vollkommen vernachlässigt. Dies führt dazu, dass es quasi unmöglich ist, die Messergebnisse für kurze Prüffahrten zu vergleichen [vgl. DIN EN 16803-1].
- das stochastische Verhalten der Prüfgegenstände nicht berücksichtigt wird. Dies führt insbesondere bei kurzen Prüffahrten zu viel Interpretationsspielraum.

Diese offenen Punkte, die sich mit den Zielen dieser Arbeit decken (siehe Abschnitt 1.3), werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

5 Qualitätsmerkmale zur Quantifizierung der Messqualität satellitenbasierter Ortungssysteme

Bei der Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen finden sich in Normen und Literatur eine Vielzahl verschiedenster Qualitätsmerkmale. Wie in Unterkapitel 4.3 dargestellt, sind diese nicht eindeutig definiert und ermöglichen verschiedenste Interpretationen [vgl. van Diggelen 1998]. Grund dafür ist die Vermischung von Qualitätsmerkmalen auf unterschiedlichen Systemebenen in den entsprechenden Kreisen. Dabei werden laut Lu mögliche Annahmen und Randbedingungen nicht über Systemgrenzen hinweg übertragen [vgl. Lu 2014]. Ein Überblick über die relevanten metrologischen Qualitätsmerkmale⁶ auf den Ebenen der verschiedenen Akteure (GNSS-Systembetreiber, GNSS-Empfängerhersteller und Nutzer) ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

Qualitätsmerkmale aus Sicht des GNSS-Systembetreibers	Qualitätsmerkmale aus Sicht der GNSS-Empfängerhersteller	Qualitätsmerkmale aus Sicht des Nutzers
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genauigkeit ▪ Integrität ▪ Verfügbarkeit ▪ Kontinuität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genauigkeit ▪ Integrität ▪ Verfügbarkeit ▪ Überlebensfähigkeit ▪ Sensitivität ▪ Latenz ▪ Messfrequenz ▪ Akquisitionszeit ▪ Vergleichbarkeit ▪ ... 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genauigkeit ▪ Integrität ▪ Verfügbarkeit ▪ Überlebensfähigkeit ▪ Akquisitionszeit ▪ Messfrequenz

Abbildung 5-1: Relevante Qualitätsmerkmale verschiedener Akteure in der GNSS-Entwicklung

Für Satellitensystembetreiber haben die Qualitätsmaße *Genauigkeit*, *Verfügbarkeit*, *Integrität* und *Kontinuität* des Satellitensystems eine übergeordnete Rolle [vgl. DO-229-D]. Diese Qualitätsmaße sind für den Systemintegrator bei der Integration von GNSS-Empfängern ebenfalls die bedeutsamsten Qualitätsmaße und anwendungsbezogen. Dennoch werden die Genauigkeiten unterschiedlich interpretiert.

Anders als beim Systembetreiber, der die Genauigkeit auf die in der Navigationsnachricht geschätzten Ephemeriden und resultierenden Bahndaten bezieht, versteht der Systemintegrator die Genauigkeit bezogen auf die Ortsausgabe des GNSS-Empfängers. Der Einfluss der erdnahen Messbedingungen (Abschattung und Mehrwegeeffekte) wird bei den Systembetreibern vernachlässigt, für den Systemintegrator ist die Qualität unter erdnahen Einflüssen jedoch von übergeordneter Bedeutung. In Abhängigkeit

⁶ Qualitätsmerkmale wie die Nutzungszeit, der Herstellerpreis,... wurden hier nicht berücksichtigt.

von der Anwendung sind weitere Qualitätsmerkmale wie Tracking-Sensitivität, Ortungslatenz, Vergleichbarkeit und Time-to-First-Fix (Zeitintervall bis zur ersten Bereitstellung des Orts) üblich.

Für den Nutzer sind wiederum in erster Linie Genauigkeit, Integrität und Überlebensfähigkeit des Empfängers sowie Time-to-First-Fix von Bedeutung.

Wurde eine Anwendungsebene der Akteure (siehe Abbildung 5-1) ausgewählt, schließt sich die Frage nach der Tiefe der Betrachtung an. Abbildung 5-2 zeigt verschiedene Schnittstellen, an denen Prüfgrößen aus dem Ortungsprozess entnommen werden können.

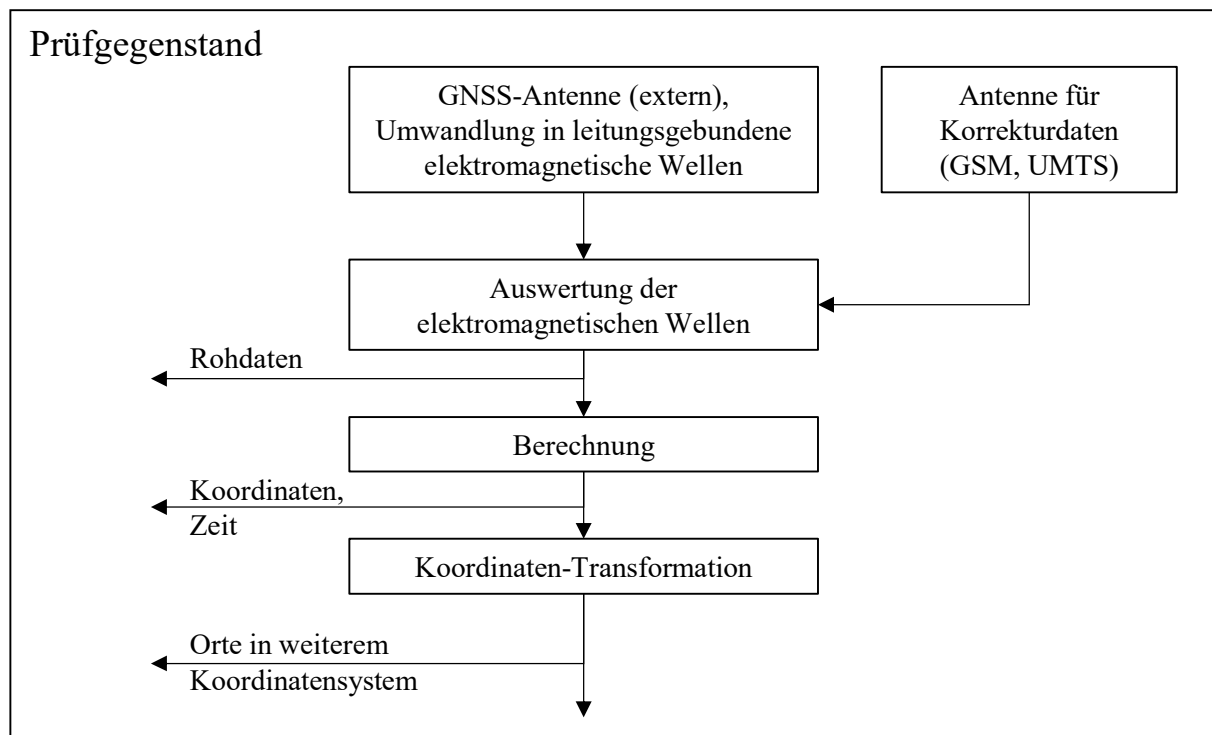


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung verschiedener Prüfgrößen in einem GNSS-Empfänger

Hochwertige Ortungssysteme ermöglichen die Erhebung von Messdaten ausgehend von Rohdaten (z. B. Pseudodistanzen und Dopplerfrequenzen) bis zu finalen, fusionierten und in weitere Koordinaten transformierten Daten. Günstigere GNSS-Empfänger geben oft nur standardisierte NMEA-Daten aus. NMEA-Daten beinhalten lediglich reduzierte Informationen, wie z. B. geschätzte Ortskoordinaten, die Anzahl an ausgewerteten Satellitensignalen und Elevationen und die Azimute der Satelliten [vgl. Langley 1995].

Aufgrund dieser Unterschiede und Variablen werden nachfolgend die verwendeten Qualitätsmerkmale und die dazugehörigen Prüfgrößen satellitenbasierter Ortungssysteme auf der Ebene des Systemintegrators für bodengebundene Anwendungen definiert. Die Arbeit konzentriert sich auf die Ausführungen auf der Ebene der Koordinaten in einem ECEF-Koordinatensystem.

5.1 Verteilung von Anforderungen und Stichproben

Wird ein System entwickelt, stehen in der Regel Standards, Normen und Richtlinien bereit, um Anforderungen hinsichtlich bestimmter Qualitätsmerkmale an das System zu definieren. Dies sind beispielsweise die in der Bahnindustrie bekannten SILs oder die aus der Automobilindustrie bekannten ASILs. Den einzelnen SIL-Stufen werden in der DIN EN 50129 tolerierbare Gefährdungsraten im Schienenverkehr zugeordnet. So gilt für SIL 4 eine tolerierbare Gefährdungsrate (THR) pro Stunde und pro Funktion von $10^{-9} \leq THR \leq 10^{-8}$ [vgl. DIN EN 50129]. Ausgehend von den Anforderungen werden von den Systemingenieuren spezifische Anforderungen an ein Untersystem gestellt und anschließend für einzelne Sensoren abgeleitet. In Abhängigkeit von den implementierten Fusionsalgorithmen ist es üblich, dass die Anforderungen an die einzelnen Sensoren geringer sind als an das Gesamtsystem (klassisches Prinzip des Kalman-Filters [vgl. Bevely/Cobb 2010]). Diese Anforderungen sind am Beispiel einer Ortungseinheit in Abbildung 5-3 (links) dargestellt. Die Anforderungen an das Ortungssystem (links oben) und die abgeleiteten Anforderungen an die Sensoren (Mitte linke Seite) werden jeweils mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion anhand verteilungsabhängiger Parameter dargestellt (z. B. anhand der Größen des Mittelwerts und des Streuparameters (für eine bestimmte Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 %))).

Um diese zu prüfen, werden, sofern der Prüfaufbau, das Prüfsystem und der Prüfgegenstand es ermöglichen, Messreihen erhoben. Um Informationen aus den Messwerten zu extrahieren und Größenwerte abzuleiten, wird versucht, die den Messwerten zugrundeliegende Verteilungsfunktion zu identifizieren. Durch die Darstellung der Messwerte mit relativen Häufigkeiten lässt sich eine Verteilung oft erahnen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 5-3 (oben rechts) dargestellt.

Die verteilungsabhängigen Parameter werden anhand der Messwerte geschätzt. Um zu prüfen, ob die Stichprobe der ausgewählten Verteilungsfunktion folgt, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung [vgl. Caspary/Wichmann 2007]:

- Eine qualitative Aussage kann über grafische Darstellungen wie dem Probability-Probability-Diagramm oder dem Quantile-Quantile-Diagramm getroffen werden.
- Eine quantitative Bewertung kann anhand von Hypothesentests durchgeführt werden. Gängige Verfahren sind der Chi-Quadrat- oder der Kolmogorow-Smirnow-Verteilungstest.

Ist die ermittelte Wahrscheinlichkeit der Übereinstimmung größer als das Signifikanzniveau, trifft die Annahme mit der gewählten Wahrscheinlichkeit zu. Folglich kann auf die parametrische Beschreibung zurückgegriffen werden. Weisen die Anforderungen an den Sensor und die Verteilung der Stichprobe auf die gleiche Verteilungsfunktion hin, können die Anforderungen anhand der verteilungsabhängigen Parameter verglichen oder die Wahrscheinlichkeit für einen Grenzwert bestimmt werden. Dabei müssen die Größen für einen Wahrscheinlichkeitswert um die halbe Breite des Überdeckungsintervalls korrigiert werden, um die Messunsicherheit der Qualifizierung zu berücksichtigen. [vgl. Wegener 2013].

Verwirft der Hypothesentest die Verteilungshypothese der Messwerte, muss die angenommene Verteilung angepasst oder auf die nicht-parametrische Statistik zurückgegriffen werden [vgl. Caspary/Wichmann 2007] .

Wird die nicht-parametrische Statistik angewandt, können die Anforderungen an die Häufigkeitsverteilung des Sensors und der erhobenen Messwerte anhand von Perzentilen verglichen werden. Auch hier müssen die Perzentile um die halbe Breite des Überdeckungsintervalls korrigiert werden. Selbst wenn die zugrundeliegenden Messwerte einer Normalverteilung mit übermäßig breiten Flanken folgen, kann anhand der Perzentile die Konformität geprüft werden. Es muss lediglich sichergestellt sein, dass die Stichprobe der Messwerte repräsentativ für den Prüffall ist. Dieses Verfahren ist grafisch im unteren Bereich der Abbildung 5-3 dargestellt.

Weiterführende Literatur, insbesondere mit Bezug zur Ortung, ist in [Caspary/Wichmann 2007] zu finden. Im Folgenden wird auf die parametrische und auf die nicht-parametrische Beschreibung der Qualität für die Ortsgenauigkeit eingegangen.

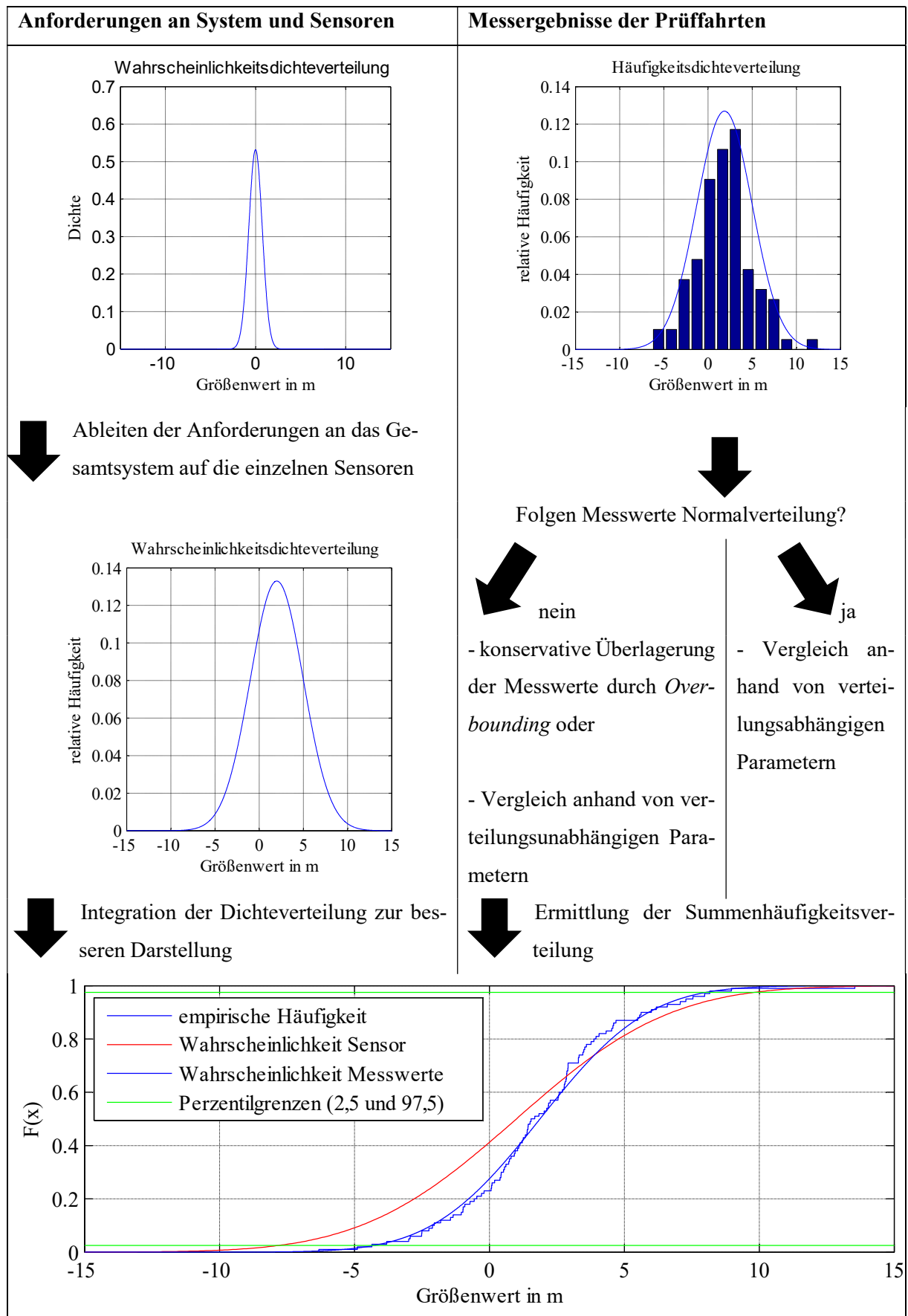


Abbildung 5-3: Vergleich der Qualitätsmerkmale mit spezifizierten Anforderungen

5.2 Eliminierung von Ausreißern

Vor der Definition der Qualitätsmerkmale muss die zur Verfügung stehende Datengrundlage auf den Prüffall reduziert und möglicherweise von groben Messabweichungen befreit werden. Bei der Ausreißer-Eliminierung wird zwischen einem Messfehler und einer groben Messabweichung unterschieden (siehe Unterkapitel 2.4).

Damit Stichproben durch Verteilungsparameter, meistens einer Normalverteilung, beschrieben werden können, werden in einigen Prüfprozeduren, z. B. dem „Area Measurement Validation Scheme“ zur Bestimmung von Flächengrößen [vgl. JRC TN 51300] oder dem allgemeingültigen Standard ISO 5725-1 „Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Ergebnisse“ [vgl. ISO 5725-1], Messwerte eliminiert, die einen zu großen Einfluss auf die Parameter des zu beschreibenden Qualitätsmerkmals besitzen. Dabei wird in den hier genannten Normen und Richtlinien nicht hinterfragt, ob die Messwerte tatsächlich Ausreißer sind oder einfache Messwerte mit grober Messabweichung. Die eben genannten Normen und Standards nutzen den Grubbs- oder Cochran-Test, um Ausreißer zu identifizieren und definieren eine maximale Anzahl von Ausreißern von z. B. 2/9 der gesamten Stichprobengröße [vgl. JRC TN 51300].

Historisch sind Ausreißer-Untersuchungen auf die Zeit, in der Messungen per Hand im Labor durchgeführt wurden, zurückzuführen [vgl. Adunka 2007]. Bei der Erhebung von GNSS-Messdaten ist eine falsche Handhabung oder Berechnung nicht naheliegend oder würde sich durch keine Ausgabe oder kontinuierlich sehr schlechte Ausgabe bemerkbar machen. Dennoch können bei Prüffahrten bestimmte Messbedingungen vorliegen, z. B. Interferenzen, die den Empfang der Satellitensignale offenbar beeinflussen bzw. verhindern. Diese äußern sich durch ein sich stark änderndes Signal-zu-Rausch-Verhalten in den Empfängern [vgl. Stanisak et al. 2015; Irsigler 2008]. Die Eliminierung von Ausreißern führt zur Informationsreduktion und meistens zu positiven Messergebnissen.

Caspary und Wichmann schlagen vor, erst alle Messwerte zu identifizieren, die einen Grenzabstand von größer $\pm 3\sigma$ aufweisen. Anschließend soll jeder Messwert untersucht werden. Diejenigen, die nachweislich durch grobe Fehler entstanden sind, dürfen gestrichen werden. Die restlichen Werte gehen als Messwerte mit groben Messabweichungen in die Berechnung der Qualitätsmerkmale ein. [vgl. Caspary/Wichmann 2007].

Dieses ohne eine direkte Eliminierung auskommende Verfahren scheint schlüssig und wird daher in der vorliegenden Arbeit angewandt.

5.3 Startwert und Endwert einer Messreihe

Bei der Probennahme wird ein Prüfscenario durchfahren, das sich aus verschiedenen Prüffällen zusammensetzt. Dabei stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt bzw. an welchem Ort die Bestimmung der Qualitätsmerkmale gestartet und beendet werden soll. Mehrere Start- und Endzeitpunkte sind möglich.

Die Bestimmung der Qualitätsmerkmale könnte ab dem Anschaltzeitpunkt des Ortungssystems beginnen. Dagegen spricht, dass dabei weder das Einschwingverhalten noch der notwendige Zeitraum bis zum Empfang der kompletten Ephemeriden berücksichtigt würden. Die Bestimmung des Start- und Endwerts wird oft mit einem Ausreißer-Test kombiniert. Dies hat zur Folge, dass in der Regel der gesamte Einschwingvorgang eliminiert wird. Eine weitere Möglichkeit ist, den Startzeitpunkt dann zu wählen, wenn das Ortungssystem eingeschwungen ist. Ein Ortungssystem gilt als eingeschwungen, wenn die vom Prüfgegenstand bereitgestellte Protektionsgrenze (Protection Limit (PG)) die für eine Anwendung spezifizierte Alarmgrenze (AL) für ein spezifiziertes Zeitintervall eingehalten hat. [vgl. IEC 61108-1].

Dieser Fall ist exemplarisch in Abbildung 5-4 dargestellt. Der Startpunkt der Genauigkeitsauswertung liegt dementsprechend bei Epoche 278 ab dem Startzeitpunkt der Messung. Dieses Vorgehen zur Festlegung der Startzeit oder -orts wird in der vorliegenden Arbeit übernommen. Der Endzeitpunkt oder -ort einer Messung ist erreicht, sobald die Messung für ein erforderliches Zeitintervall aufrechterhalten wurde oder der Prüfräger den begrenzenden geografischen Bereich (Geofence) verlassen hat.

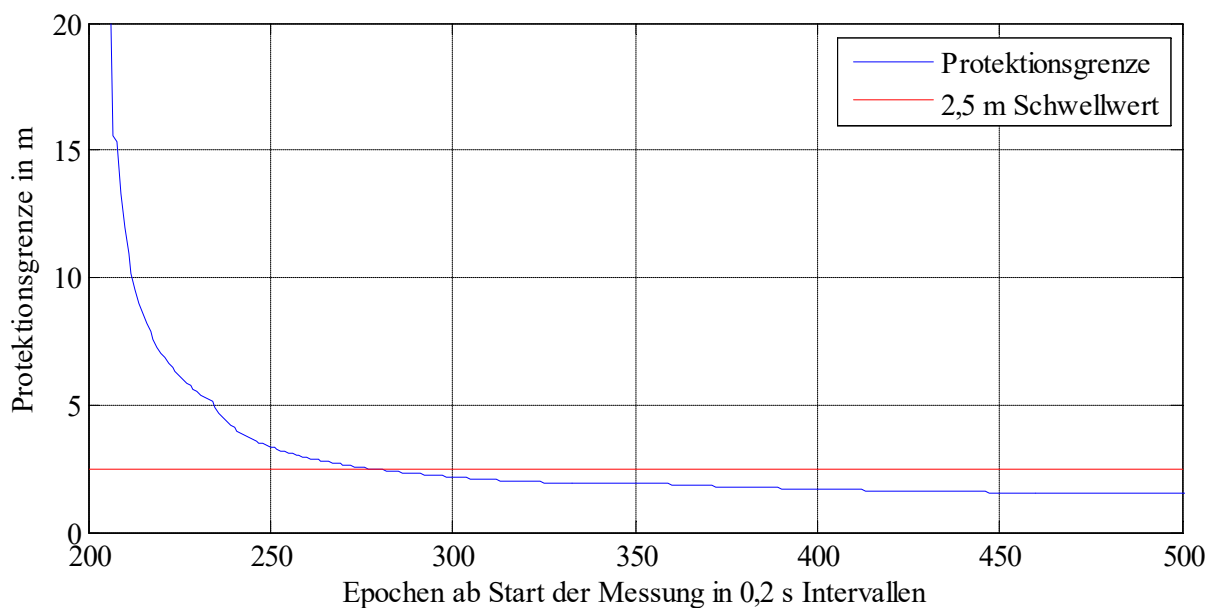


Abbildung 5-4 Einschwingbereich der Protektionsgrenze ab Beginn der Messung

Lediglich für die Prüfgröße der Ortsakquisitionszeit kann dieses Vorgehen nicht übernommen werden. Für die Ortsakquisitionszeit beginnt die Startzeit mit dem Zeitpunkt der Versorgung des Ortungssystems mit Energie und endet zu dem Zeitpunkt, sobald die Integrität verfügbar ist oder die spezifizierte Genauigkeit eingehalten wird.

5.4 Maßgebliche Qualitätsmaße zur Beschreibung der Ortungsqualität

Die maßgeblichen Qualitätsmerkmale werden durch die RNP-Qualitätsmaße aus der Luftfahrt und Marine (engl. Required Navigation Performance) definiert [vgl. DO-229-D; IEC 61108-1]. Die Bestimmung der RNP-Qualitätsmaße basiert auf statistischen Methoden, die erforderlich sind, da einzelne Messungen nicht beliebig oft wiederholt werden können und die Messergebnisse daher nicht exakt vergleichbar sind (siehe Unterkapitel 3.10). [vgl. Hedderich 2016]. Im Folgenden wird auf die maßgeblichen Qualitätsmerkmale eingegangen.

5.4.1 Ortsgenauigkeit mit Beschreibung der parametrischen Statistik

Die RNP-Qualitätsmaße basieren auf der Ortsgenauigkeit. Die Qualitätseigenschaft *Ortsgenauigkeit* ist in der Literatur definiert und bekannt. Sie wird für den eindimensionalen Fall anhand der Ortsrichtigkeit quantifiziert. Die Ortsrichtigkeit berechnet sich wie folgt [vgl. DIN ISO 5725-2; Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]:

$$\Delta y = y - \hat{y}. \quad (5-1)$$

In der Gleichung beziffert Δy die Ortsrichtigkeit als Ergebnis der Differenz des Größenwerts y und einem durch ein Referenzmesssystem bereitgestellten Referenzwert \hat{y} . Weisen die Messwerte ein zeitvarianten Verhalten auf, müssen der Messwert und der Referenzwert zum selben Zeitpunkt gültig sein.

Für den Fall von Messreihen und einer parametrischen Beschreibbarkeit wurde eine generalisierte Beschreibungsform zur Bestimmung der Ortsgenauigkeit entwickelt. Diese ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die abstrakte, nicht bestimmbare Eigenschaft der Ortsgenauigkeit wird auf Merkmalsebene durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ortsabweichungen charakterisiert. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ortsabweichung wird wiederum durch die generischen Merkmale der Verteilungsfunktionen präzisiert. Diese beschreiben die Verteilung der Messwerte. Der generischen Verteilungsfunktion werden eine Wahrscheinlichkeit und eine Parametermenge zur Beschreibung der Verteilungsfunktion zugeordnet. Die Anzahl der Parameter hängt von der Verteilungsfunktion ab. Die Größen werden entsprechend der vierten Ebene der Attributhierarchie abschließend mit einem Wertebereich und mit Einheiten präzisiert.

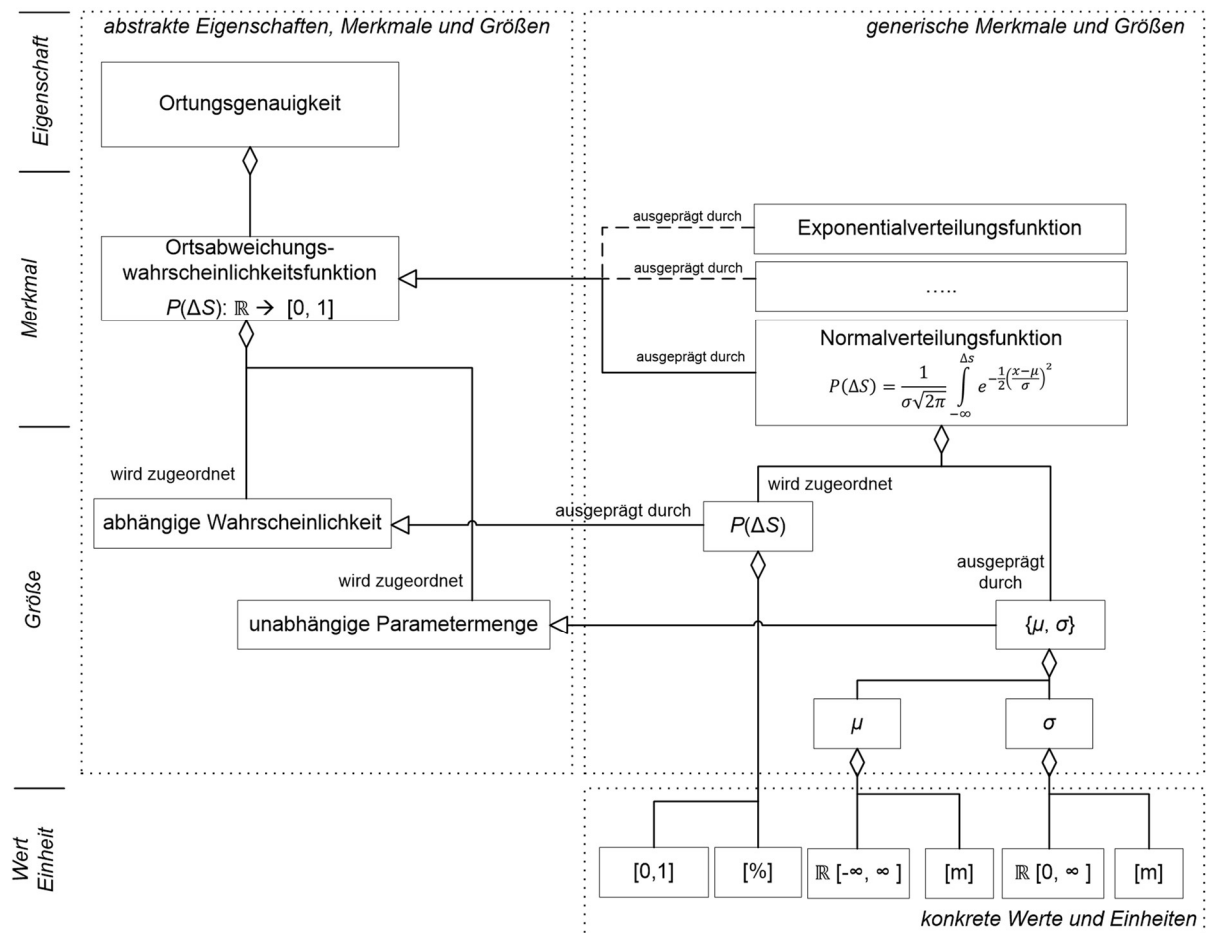


Abbildung 5-5: Terminologisch-strukturelle Beschreibung der Ortsgenauigkeit

Kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ortsabweichung durch die Normalverteilungsfunktion beschrieben werden, gilt, dass die Normalverteilungsfunktion durch die Größenparameter Standardabweichung und Erwartungswert – die für diese Verteilungsfunktion auch mit der Ortspräzision und der Ortsrichtigkeit beschrieben werden können – parametrisiert wird. Für die Ortspräzision sind dies ein nicht negativer metrischer Wert und für die Ortsrichtigkeit ein metrisches Maß. Bei normalverteilten Messwerten werden der Lageparameter als mittlere Ortsrichtigkeit \bar{y} und die Ortspräzision s für die Streuung festgelegt. Die Ortsrichtigkeit als arithmetisches Mittel der Messwerte ergibt sich aus [vgl. DIN ISO 5725-2]:

$$\bar{y}(\Delta y(1), \dots, \Delta y(K)) = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \Delta y_k. \quad (5-2)$$

In der Gleichung steht \bar{y} für den Mittelwert der Stichprobe vom Umfang K . Allein die Ortsrichtigkeit ermöglicht jedoch keine Aussage über die Verteilung der Messwerte. Diese ist anhand des Streuparameters der Ortspräzision möglich und wird durch die empirische Standardabweichung der Messreihe quantifiziert. Die Ortspräzision errechnet sich nach:

$$s(\Delta y(1), \dots, \Delta y(K)) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \Delta y_k^2}. \quad (5-3)$$

Dabei ist die Streuung s eine nicht negative Größe und Δy_k die Ortsabweichung der Messung K . Für eine Normalverteilung bedeutet die Streuung, dass ca. 68 % der Werte in dem Werteintervall $\bar{y} \pm s$ liegen. Mittels Multiplikation der Standardabweichung mit einem Erweiterungsfaktor von 1,96 lässt sich das Werteintervall für die in der Wissenschaft üblichen 95% ermitteln [vgl. Caspary/Wichmann 2007].

Liegt eine eindimensionale Betrachtung der Ortsgenauigkeit vor, wird die Verteilung der Stichprobe meistens für sehr lange Messreihen (mehrere Jahre) als eine symmetrische Verteilung ohne systematische Abweichungen angenommen [vgl. IEC 61108-1]. In der Realität weisen die Ortsabweichungen über viele Messwerte jedoch breitere Flanken auf als für die Normalverteilung angenommen [vgl. van Diggelen 1998]. Deshalb wird in seltenen Fällen auf die Cauchy-Verteilung zurückgegriffen [vgl. Bétaille et al. 2016]. In der Luftfahrt wird die Annahme der Normalverteilung durch Overbounding im Randbereich erweitert, um die breiten Flanken in der Sicherheitsbetrachtung berücksichtigen zu können [vgl. Rife et al. 2004].

Für viele Anwendungen ist die Ortsgenauigkeit in der mehrdimensionalen Ortung von Bedeutung. Verschiedene Anwendungen im Schienenverkehr haben beispielsweise deutlich höhere Anforderungen an die transversale Ortsgenauigkeit (quer zur Fahrtrichtung) als an die longitudinale (längs zur Fahrtrichtung). Um diese Merkmale zu analysieren, werden die Messabweichungen über eine Koordinatentransformation auf die Koordinatenachsen in Bewegungsrichtung abgebildet. Die Bewegungsrichtung zum Zeitpunkt der Messung basiert dabei auf einem Referenzmesssystem.

In Abbildung 5-6 sind verschiedene Koordinatensysteme auf einer geschwungenen Trajektorie dargestellt. Die Ortsrichtigkeit und die Ortspräzision können anschließend für die einzelnen Dimensionen nach Gleichung 5-1, 5-2 und 5-3 als auch für den euklidischen Abstand berechnet werden. Bei der Transformation der Betrachtung von der eindimensionalen in eine zweidimensionale Ortsabweichung ändert sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung von einer theoretischen Normalverteilung zu einer theoretischen Rayleigh-Verteilung für die euklidische Ortsgenauigkeit. Theoretische dreidimensionale Ortsabweichungen folgen der Maxwellverteilung.

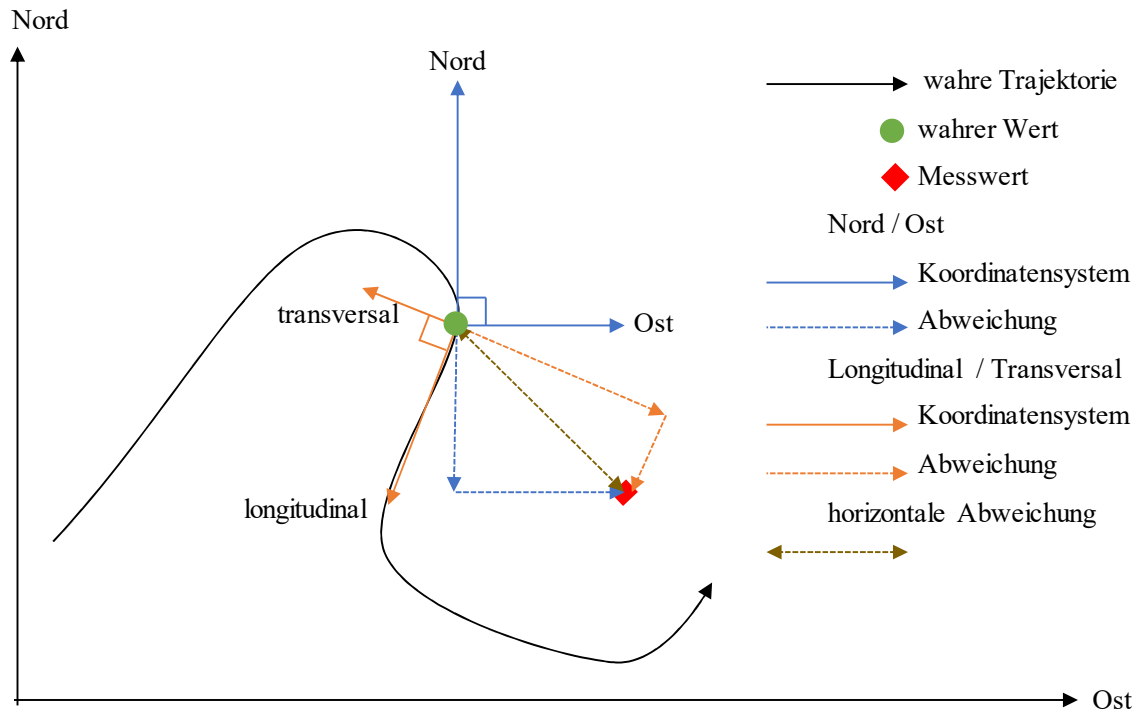


Abbildung 5-6: Zweidimensionale Darstellung der Messgenauigkeit für die Ortungsqualität

Für die Darstellung im zwei- bzw. mehrdimensionalen Fall sind verschiedene Maße zur Beschreibung der Ortsrichtigkeit und Ortspräzision bekannt. Die gängigsten sind die mittlere Ortsabweichung in Form des DRMS oder des Messabweichungskreises (CEP) (siehe Abbildung 5-7 links). Ein Umrechnungsverfahren zwischen verschiedenen Maßen ist unter anderem von van Diggelen und in der Richtlinie STANAG 4278 dargestellt [vgl. van Diggelen 1998; STANAG 4278]. Wie von Grasso Toro gezeigt, geben diese Darstellungen keinen Aufschluss über die Korrelation der Messwerte der verschiedenen Dimensionen [vgl. Grasso Toro 2015]. Erst die Darstellung der Messabweichung in Form einer Messabweichungsellipse (oft auch als Fehlerellipse bekannt) ermöglicht dies (siehe Abbildung 5-7). Die Messabweichungsellipse wird durch die Ortsrichtigkeit des Ellipsenzentrums, die Halbachsen und den Richtungswinkel dargestellt.

Sowohl bei den Messabweichungskreisen als auch bei der Messabweichungsellipse wird von normalverteilten Messwerten ausgegangen. Ist dies nicht der Fall, können die klassischen Formeln nicht angewandt werden und die Ortsqualität muss anhand der nicht-parametrischen Statistik dargestellt werden.

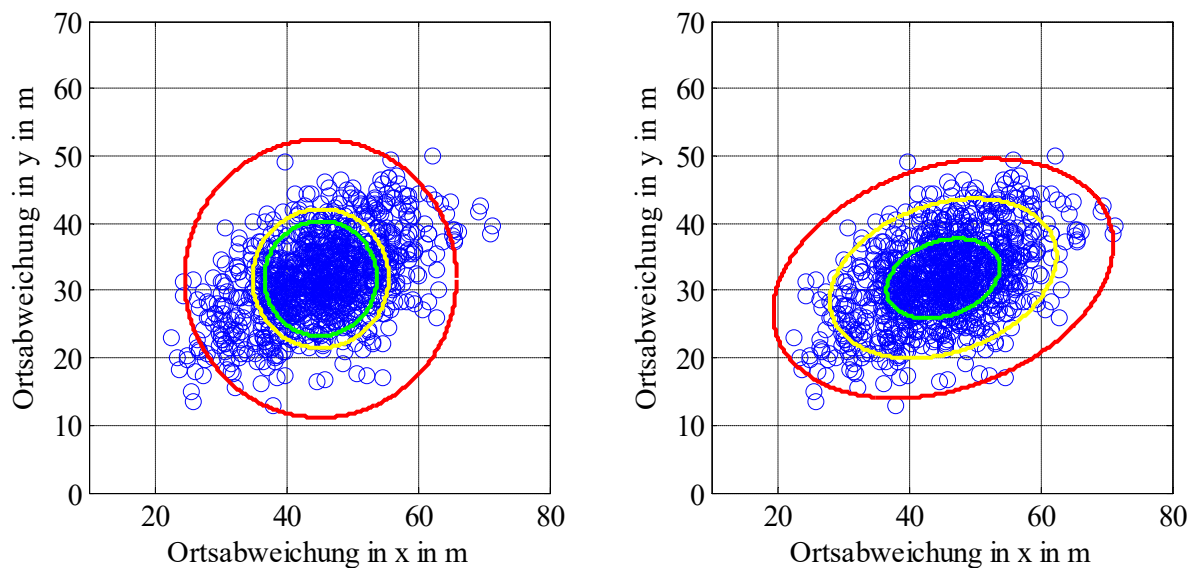


Abbildung 5-7: Verschiedene Ortsabweichungsmaße für korrelierte Stichproben . Links: CEP50 (grün), DRMS (gelb), 2DRMS (rot), rechts: Fehlerellipse mit 50 % Überdeckung (grün), 68 % (gelb), 95 % (rot)

5.4.2 Ortsgenauigkeit mit Beschreibung der nicht-parametrischen Statistik

Bedingt durch zeitlich korrelierte systematische Einflüsse (siehe Kapitel 3) sind die Stichproben der Messkampagne nicht von ausreichendem Umfang, um den angenommenen Verteilungsfunktionen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit zu folgen [vgl. van Diggelen 2007]. Insbesondere kommt es zu dem Phänomen, dass eine übermäßige Anzahl von Messwerten mit großen Ortsabweichungen im Randbereich auftritt. Wird der Hypothesentest auf eine Verteilung der Messwerte zurückgewiesen oder nur mit sehr großer Ungewissheit angenommen, sollte die Messreihe nicht direkt durch Parameter der Verteilungsfunktionen beschrieben werden.

In der Statistik gibt es verschiedene Wege, mit der Auswertung solcher Stichproben umzugehen. Diese wurden von Rife et al. zusammengefasst: Durch konservative Überlagerung der Messwerte kann eine Verteilungsfunktion gewählt werden, die die Messwerte umhüllt. Eine weitere Möglichkeit ist, die breiten Randbereiche durch Randbereichsmultiplikatoren von der Normalverteilung anzuheben oder auf die verteilungsunabhängigen Parameter zurückzugreifen. Die Überlagerung durch eine Verteilungsfunktion wird insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen zur Bestimmung der Protektionsgrenze genutzt. [vgl. Rife et al. 2004]. Dabei wird ausgehend von einer Normalverteilung eine einhüllende Normalverteilung, die den gesamten Bereich der Messwerte abdeckt, aufgespannt. Bei solchen umhüllenden Verteilungen unterliegen die Parameter der Vergleichbarkeit einzelner Messfahrten sehr hohen Ungewissheiten. [vgl. Rife/Pervan 2012].

Um eine Vergleichbarkeit von Stichproben einzelner Messfahrten, die keiner bekannten Verteilungsfunktion folgen, zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit auf die nicht-parametrische Darstellung zurückgegriffen. Eine Stichprobe und die Streuung der Messwerte können anhand des Medians und mithilfe von Perzentilen beschrieben werden.

Der Median entspricht dem Größenwert, der in der Mitte einer der Größe nach sortierten Stichprobe liegt. Besitzt die Stichprobe eine gerade Anzahl von Messwerten, wird der arithmetische Mittelwert der angrenzenden Werte als Median genutzt. Neben der Messabweichung des Medians ist zusätzlich die Streuung der Messwerte von Bedeutung. Diese kann anhand von Größenwerten für spezifizierte Perzentile angegeben werden.

5.4.3 Quantifizierung der Merkmale *Wiederholbarkeit*, *Reproduzierbarkeit* und *Vergleichbarkeit*

Durch die instationären Messbedingungen sowie durch das stochastische Verhalten der GNSS-Empfänger führen Messfahrten entlang derselben Trajektorien zu unterschiedlichen Messergebnissen. Wie stark dieser Umstand ist, kann anhand der Merkmale *Wiederholbarkeit*, *Reproduzierbarkeit* und *Vergleichbarkeit* beschrieben werden. Diese Merkmale folgen derselben nachfolgend dargestellten Berechnungsweise. Den Begriffen liegt aber eine unterschiedliche Art der Messdatenakquisition zugrunde. Sie unterscheiden sich in der Art des Messprinzips, unterliegen verschiedenen Messbedingungen und einzelne Messreihen werden von denselben oder unterschiedlichen Laboratorien akquiriert (siehe Unterkapitel 2.6.4). Im Folgenden wird am Beispiel der *Wiederholbarkeit* die Bestimmung der Qualitätsmerkmale dargestellt. Dabei werden zwei Fälle unterschieden: Die Stichprobe folgt näherungsweise einer Normalverteilung oder die Stichprobe lässt keine Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Verteilung zu, auch wenn die Grundgesamtheit der Stichprobe theoretisch bekannt ist.

5.4.3.1 Zu den Messwerten, die näherungsweise einer Normalverteilung folgen

Das Qualitätsmerkmal der *Wiederholbarkeit* wird in Normen [vgl. DIN ISO 5725-2; JRC TN 51300] und in der Literatur, z. B. von [vgl. Lu et al. 2016; Spiegel et al. 2016a], durch ein Streumaß beschrieben. Dieses beruht auf der Annahme, dass die systematischen Abweichungen während des Messprozesses durch die Messungen im Mittel nicht auftreten [vgl. Adunka 2007; Caspary/Wichmann 2007] oder bei den Wiederholungen der Messung in der gleichen Größenordnung erneut auftreten [vgl. Caspary/Wichmann 2007] und die empirische Häufigkeitsverteilung der Stichprobe einer Normalverteilung folgt [vgl. DIN ISO 5725-2]. Die Wiederholgenauigkeit wird durch verschiedene Prüflabore in Form der Wiederholpräzision mit dem Maß der Wiederholvarianz bestimmt [vgl. ISO 5725-1]. Die Wiederholgenauigkeit wird vom Verfasser in unterschiedlichen Messfahrten ermittelt und anhand der Wiederholstandardabweichung dargestellt [vgl. Spiegel et al. 2016a]. Die Wiederholstandardabweichung wird berechnet nach

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ik} - \bar{y}_i)^2}. \quad (5-4)$$

In der Gleichung steht s_i für die Wiederholstandardabweichung der Stichprobe i und n_i die Gesamtanzahl der Messwerte in der Stichprobe. Der Messwert wird mit y_{ik} beziffert und \bar{y}_i symbolisiert den arithmetischen Mittelwert der Messwerte der Stichprobe. Dieses Verfahren eignet sich für Messwerte mit bereinigten Messdaten, ist jedoch anfällig gegenüber groben Messwertabweichungen, die die Standardabweichung und die Varianz beeinflussen.

In Messkampagnen für GNSS-Empfänger wird in der Regel aufgrund wirtschaftlicher Aspekte kein ausreichend großer Stichprobenumfang erhoben, um die soeben beschriebenen Annahmen ohne Weiteres treffen zu können. Zusätzlich zur Wiederholpräzision wird der Lageparameter der Wiederholrichtigkeit in Form des arithmetischen Mittels der Stichproben aller Wiederholfahrten eingeführt. Die Wiederholrichtigkeit ermöglicht die systematischen Abweichungen einer Stichprobe zu quantifizieren. Die Wiederholrichtigkeit wird ähnlich Formel 5-2 bestimmt.

5.4.3.2 Zu Stichproben, die keiner parametrischen Verteilungsform folgen

Folgt die Stichprobe keiner Normalverteilung, ist die Beschreibung durch die verteilungsabhängigen Parameter der Standardabweichung und des arithmetischen Mittelwerts nicht mehr aussagekräftig und verhindert die Vergleichbarkeit [vgl. ISO 5725-1]. Regelmäßig liegt ein solcher Fall bei Stichprobengrößen vor, die nicht ausreichend groß sind, damit die Ortsabweichungen der Messwerte einer Normalverteilung folgen. Um dennoch die Wiederholgenauigkeit quantitativ beschreiben zu können, ist ein neues Qualitätsmaß erforderlich, das große Messabweichungen im Randbereich berücksichtigt und ermöglicht, Stichproben zu quantifizieren, die keiner Normalverteilung folgen.

Dieses Qualitätsmaß basiert auf den Ortsabweichungen einer Messreihe. Die Ortsabweichungen werden vom kleinsten bis zum größten Wert sortiert und die empirischen relativen Summenhäufigkeitsfunktionen gebildet und in einem Diagramm visualisiert (siehe Abbildung 5-8). Nachdem die empirischen relativen Summenhäufigkeitsfunktionen mehrerer Messreihen eingezeichnet wurden, werden die obere Schranke (die jeweils größte Ortsabweichung eines Perzentils – grün in Abbildung 5-8) und die untere Schranke (die jeweils kleinste Ortsabweichung eines Perzentils – rot in Abbildung 5-8) gebildet. Anschließend wird die von der oberen und unteren Schranke definierte Fläche bestimmt und der arithmetische Mittelwert gebildet.

Der Größenwert der mittleren Fläche stellt die Wiederholgenauigkeit der Messfahrten dar. Liegt eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit vor, liegen die empirischen relativen Summenhäufigkeitsfunktionen der einzelnen Messfahrten sehr nah beieinander. Die mittlere Fläche ist dann dementsprechend klein.

Liegen die empirischen relativen Summenhäufigkeitsfunktionen der Messfahrten sehr weit auseinander, ist die mittlere Fläche groß. Folglich liegt eine geringe Wiederholgenauigkeit vor.

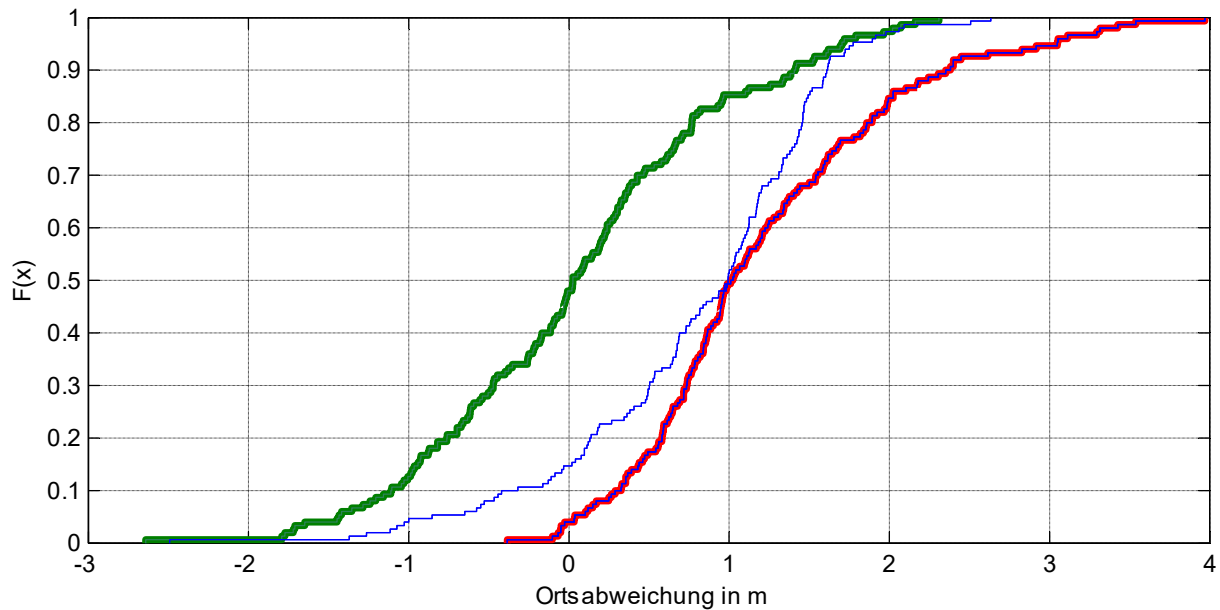


Abbildung 5-8: Ortsabweichung für drei Wiederholfahrten. grün – obere Schranke, rot – untere Schranke, blau – empirische relative Summenhäufigkeitsfunktionen einer Messreihe

Die Wiederholgenauigkeit ist abhängig von den während der Messfahrt vorliegenden Messbedingungen. Um dieses Verhalten zu berücksichtigen, ist es sinnvoll, einen Prüfgegenstand in unterschiedlichen Messumgebungen zu prüfen. Vom Verfasser konnte gezeigt werden, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Wiederholgenauigkeit und dem Median der horizontalen Ortsabweichung für einzelne Prüffälle vorliegt, solange eine ausreichend große Anzahl an Messwerten vorhanden ist [vgl. Spiegel et al. 2016b]. Die Anzahl der Wiederholungen für Sonderprüffälle (z. B. Tunnel, Brücken), bei denen weniger als 1000 Messwerte erhoben wurden, repräsentiert die Wiederholgenauigkeit laut Verfasser nicht ausreichend.

Für unterschiedlichste Prüffälle und einen Messreihenumfang von elf ist die Wiederholgenauigkeit der Prüffälle in Abbildung 5-9 über dem Median der horizontalen Ortsabweichung des Prüffalls dargestellt. Der Zusammenhang zwischen dem Median einer Prüffahrt und der Wiederholgenauigkeit kann anschließend über eine Regressionsgerade beschrieben werden. Die Steigung der Regressionsgeraden ergibt sich dabei als Größe zur Beschreibung der Wiederholgenauigkeit eines Prüfgegenstands.

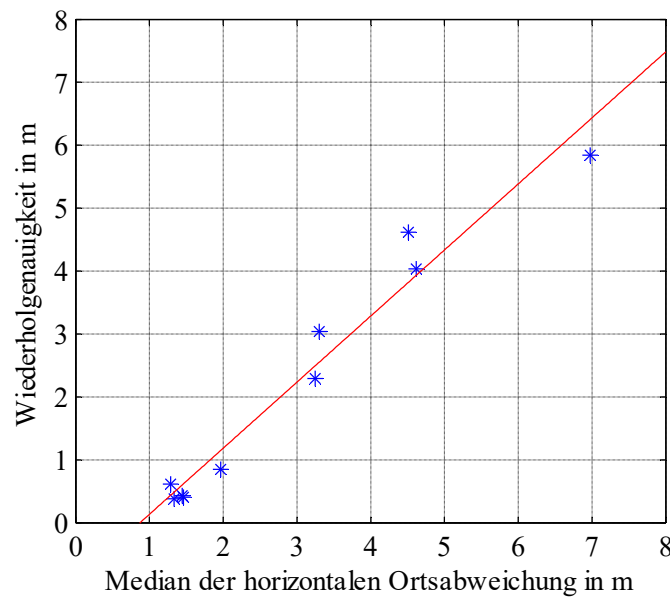


Abbildung 5-9: Wiederholgenauigkeit für einen Automotive-GNSS-Empfänger w (*) für einzelne Szenarien und die dazugehörige Regressionsgerade (–) ($w = 1,1 \cdot \bar{y} - 0,92$).

Bei der Bestimmung der Wiederholgenauigkeit ist die Anzahl der Wiederholfahrten essenziell. Denn je größer die Anzahl der Messfahrten ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass durch Abweichungen die Fläche zwischen der oberen und unteren Schranke größer wird. Gleichzeitig sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass große Änderungen des Bereichs eintreten. Daraus resultiert die Frage, wie viele Messfahrten minimal erforderlich sind, um verlässliche Werte zu erzeugen, die die Wiederholgenauigkeit bestimmen (vgl. dazu Unterkapitel 8.5). Um die Wiederholgenauigkeit beschreiben zu können, muss das Merkmal der Steigung validiert werden. Dies geschieht in Unterkapitel 8.3.3 anhand von unterschiedlichen Empfängern.

5.4.4 Ortsintegrität (engl. *Integrity*)

Die Ortsintegrität beschreibt den Grad des Vertrauens in die gelieferten Ortungsinformationen und die Fähigkeit des Systems, eine rechtzeitige Warnung auszugeben, wenn es nicht mehr für die Ortsbestimmung genutzt werden sollte [vgl. U. S. Department of Defence, U. S. Department of Homeland Security and U. S. Department of Transportation 2010].

Dabei wird der Terminus *System* oft in verschiedenen Kontexten verwendet. In den Signal-und-Space-Spezifikationen (SIS) bezieht sich die Integrität beispielsweise auf den vom Satellitensystem ausgehenden User Range Error (URE), erdnahe Signaleinflüsse werden dabei vernachlässigt [vgl. U. S. Department of Defense 1995]. In dieser Arbeit wird hingegen die Integrität auf der Ebene der Ortsausgabe durch den Prüfgegenstand betrachtet. Dadurch werden sowohl die erdnahen als auch die globalen Einflüsse auf das Messergebnis berücksichtigt.

Die Integrität eines Messwerts wird auf Basis von Algorithmen in den GNSS-Empfängern bestimmt. Diese Algorithmen können sowohl autark anhand des Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) den

Integritätszustand bestimmen oder auf Integritätsinformationen von lokalen (LBAS) oder satellitengestützten Korrekturdiensten (SBAS) zurückgreifen. Auch die Kombination verschiedener Integritätsverfahren ist möglich. Damit die Integrität bestimmt werden kann, bedarf es eines überbestimmten Systems. In Abhängigkeit vom Algorithmus und der Berechnungsmethode variiert die Mindestanzahl erforderlicher Satellitensignale (mind. 5 Satellitensignale für RAIM) [vgl. Brown/Chin 1998].

Der Grad des Vertrauens in einen Messwert wird in Form eines Konfidenzintervalls, der sogenannten Protektionsgrenze (engl. *Protection Limit*), durch den GNSS-Empfänger angegeben (schematisch dargestellt in Abbildung 5-10). Die Protektionsgrenze wird in Kreisform mit dem vom Empfänger geschätzten Ort als Zentrum dargestellt. Die Protektionsgrenze ist keine konstante Größe, vielmehr variiert diese über die Zeit. Aus der intendierten Anwendung heraus werden Anforderungen an die Ortung gestellt. Können diese Anforderungen nicht mehr eingehalten werden, soll ein Alarm ausgelöst werden. Die Anforderungen werden in der Form einer Alarmgrenze um den wahren Wert gelegt. Übersteigt die Protektionsgrenze die Alarmgrenze, soll das System direkt oder nach einem maximalen Zeitintervall (Zeit bis zum Alarm - engl. *Time-to-Alarm*) einen Alarm auslösen. Während der Qualifizierung eines satellitenbasierten Ortungssystems ist der wahre Ort bekannt, dieser ist während des anschließenden Betriebs nicht mehr bekannt.

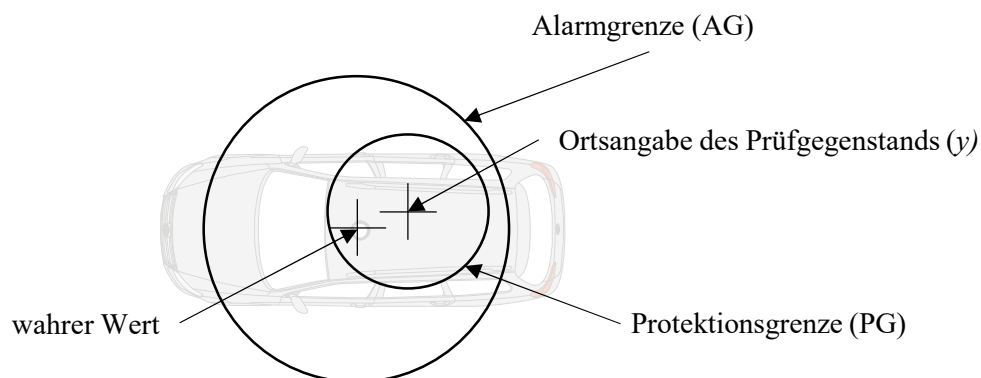


Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Protektionsgrenze und der Alarmgrenze

Sowohl die Alarmgrenze als auch die Zeit bis zum Alarm sind von den Anforderungen der einzelnen Anwendungen abhängig und variieren teilweise auch in Abhängigkeit von Betriebsoperationen. In dieser Arbeit bedeutet *statische Integritätsbetrachtung* grundsätzlich eine statische Integrität ohne Berücksichtigung der Zeit bis zum Alarm. Wird das Zeitintervall berücksichtigt, wird die Integrität ausdrücklich als dynamische Integrität gekennzeichnet.

Die statischen Integritätszustände werden anhand des Stanford-Diagramms (Abbildung 5-11) dargestellt [vgl. Stanford University (WADGPS Laboratory) 1997]. Die Ortsintegrität lässt sich in die verschiedenen Systemzustände *verfügbar*, *unverfügbar* und *gefährlich* unterteilen. Die Unterscheidung in die unterschiedlichen Systemzustände erfolgt anhand der Protektionsgrenze, der Alarmgrenze und der Ortsabweichung. Insgesamt ergeben sich somit sechs Flächen, die jeweils einen Betriebszustand darstellen.

Die Zuordnung der Messwerte zu den Betriebszuständen erfolgt anhand der ebenfalls im Diagramm dargestellten Bedingungen. Die Integrität eines Messwerts und Systems gilt als *verfügbar*, wenn der korrekte oder der *irreführende Betriebszustand* eintreten. Ein System gilt als *unverfügbar*, wenn das System *unverfügbar* ist oder *unverfügbare und irreführende Informationen* bereitstellt. Ein gefährlicher Betrieb setzt ein, wenn die bereitgestellte Protektionsgrenze kleiner als die Alarmgrenze, die Ortsabweichung jedoch größer als die Alarmgrenze ist. Für diesen Fall gilt das System weiterhin ein Verfügbarkeitssignal aus, obwohl die Anforderungen hinsichtlich der Ortsabweichungen nicht mehr erfüllt werden. Schematisch ist ein Teil einer Prüffahrt mit den drei wichtigen Integritätszuständen in Abbildung 5-12 dargestellt.

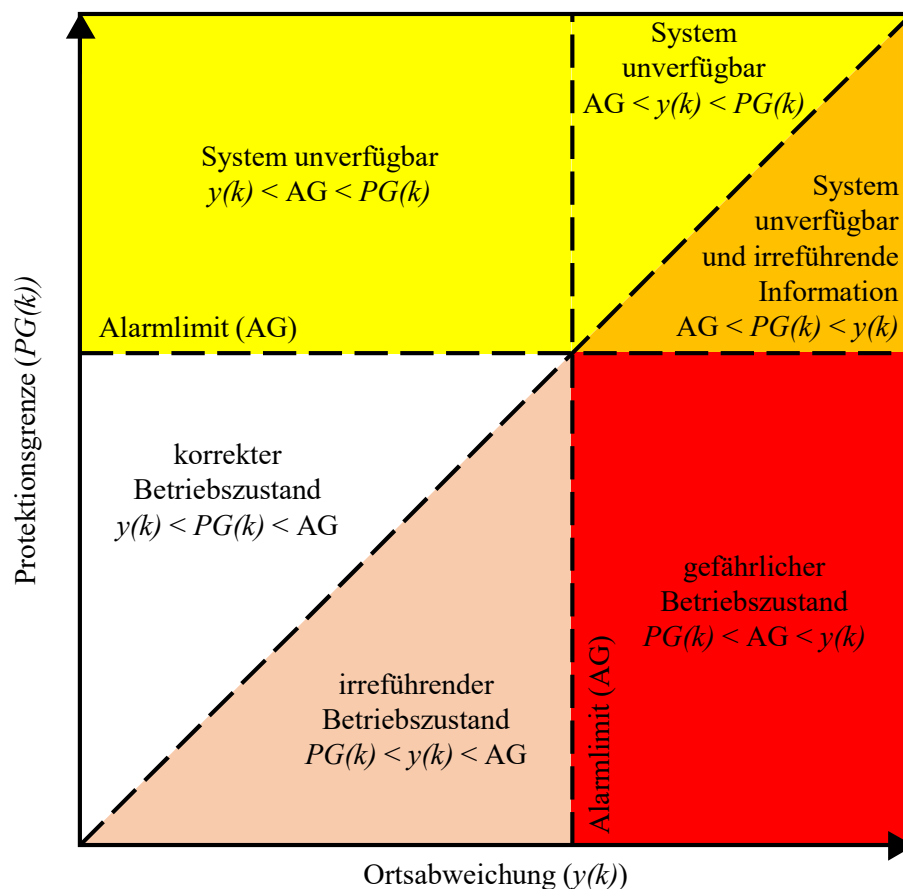


Abbildung 5-11: Stanford-Diagramm zur Kategorisierung des Systemzustands [eigene Darstellung, in Anlehnung an WADGPS Laboratory (University) 1999]

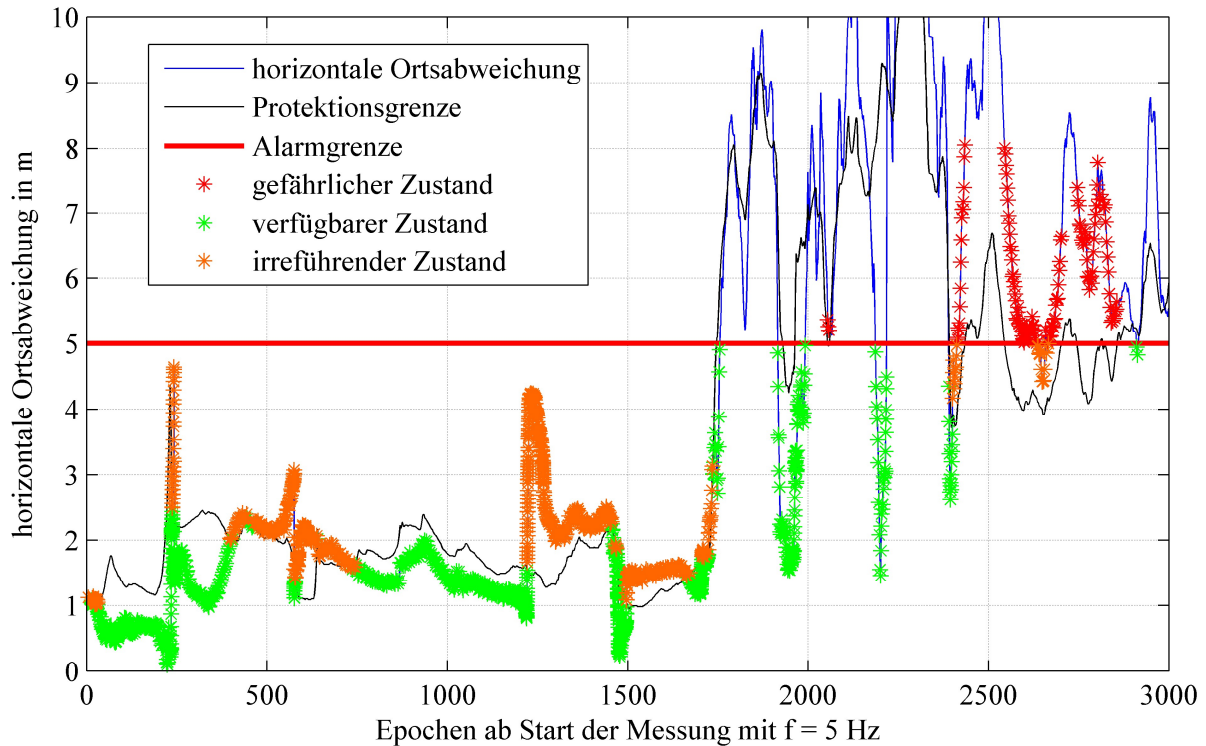


Abbildung 5-12: Verlauf der Integrität für eine typische Messreihe mit einer TTA von 6 s und einer Alarmgrenze von 5 m

Die einzelnen Klassen des Stanford-Diagramms können zusätzlich sowohl statisch als auch dynamisch quantifiziert werden. Die Bedingungen und Kategorien sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Verschiedene Kategorien des Stanford-Diagramms

korrekter Betriebszustand	System unverfügbar - falscher Alarm	System unverfügbar - korrekter Alarm	irreführender Betriebszustand	irreführende Unverfügbarkeit
$(y(k) < PG(k) < AG)$	$(y(k) < AG < PG(k))$	$(AG < y(k) < PG(k))$	$(PG(k) < y(k) < AG)$	$(AG < PG(k) < y(k))$

Die Integritätsverfügbarkeit kann sowohl statisch als auch dynamisch bestimmt werden. Der Unterschied liegt in dem Betrachtungszeitraum, wie in Abbildung 5-13 dargestellt. In der Abbildung sind die horizontale Abweichung eines GNSS-Empfängers, die vom GNSS-Empfänger bereitgestellten Protektionsgrenzen und die Alarmgrenze dargestellt. Die zwei rechteckigen Rahmen sind dabei der Betrachtungszeitraum der statischen (schmal) und dynamischen (breit) Integritätsverfügbarkeit.

Bei der statischen Integritätsverfügbarkeit wird die Verfügbarkeit jeweils für einen einzigen Messwert betrachtet. Die Ortsabweichung und die PG in dem orangen Rahmen in der Abbildung führen zu einem *unverfügbaren* Zustand, da die Bedingung $PG < AL$ nicht erfüllt ist. Bei der dynamischen Integritätsverfügbarkeitsbetrachtung wird ausgehend vom aktuellen Messwert die Messhistorie für das Zeitintervall TTA rückwirkend betrachtet. Dabei berechnet sich die Anzahl der Messwerte in der Messhistorie aus der spezifizierten Zeit bis zum Alarm und der Messfrequenz des Prüfgegenstands. Die Ortsabwei-

chungen und PGs in der Messhistorie sind in der Abbildung grün umrandet. Da die dynamische Integrität als verfügbar bewertet wird, wenn mindestens ein Messwert der Messhistorie *verfügbar* ist, gilt für den Fall der Abbildung die Messung als *verfügbar*. Dadurch, dass zusätzlich zu dem eigentlichen Messwert weitere Messwerte in die Betrachtung einfließen, ist die Anzahl der verfügbaren dynamischen Integritätswerte stets größer oder maximal gleich der Anzahl der verfügbaren statischen Integritätswerte.

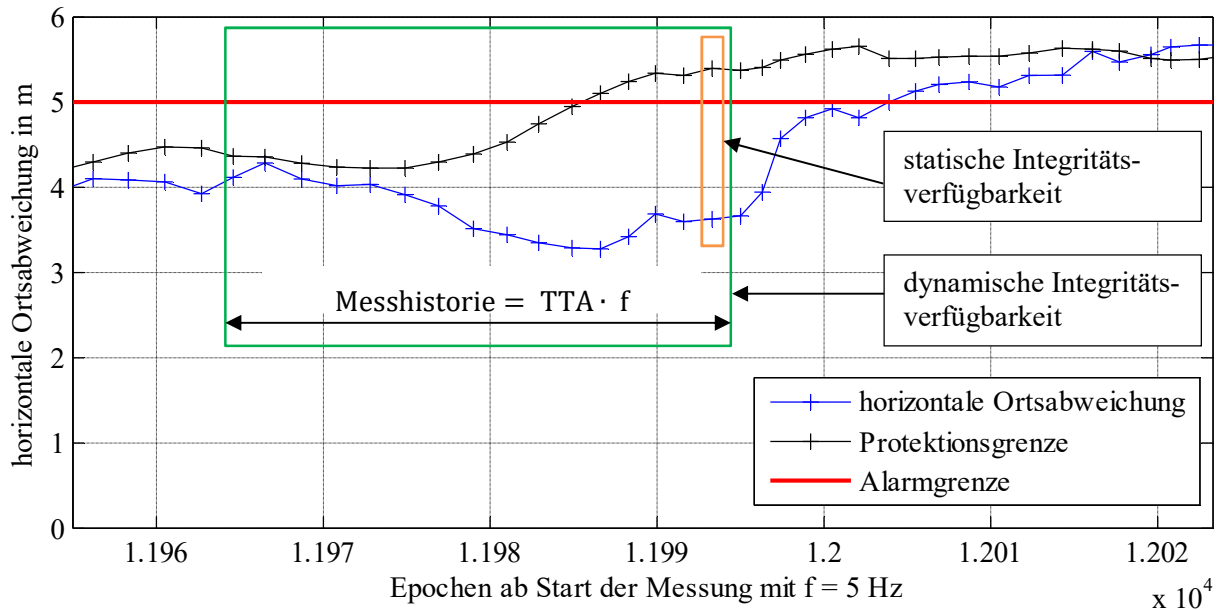


Abbildung 5-13: Unterscheidung statische und dynamische Integritätsverfügbarkeit

5.4.4.1 Integritätsverfügbarkeit

Die Integrität eines Systems ist verfügbar, wenn die Größenwerte der Ortsabweichung $y(k)$ und Protektionsgrenze $PG(k)$ kleiner als die Alarmgrenze AL sind. Dabei ist es möglich, dass die Alarmgrenze in Abhängigkeit von der Fahrsituation oder der Messumgebung variiert. Für die folgenden Auswertungen wird von einer statischen Alarmgrenze ausgegangen. Die Häufigkeit der statischen Integritätsverfügbarkeit $I_{A,S}$ berechnet sich aus der Anzahl statischer verfügbarer Messwerte $n_{I_{A,S}}$ und der Anzahl der Messwerte K nach:

$$I_{A,S} = \frac{n_{I_{A,S}}}{K}, \text{ mit } I_{A,S} \in [0,1]. \quad (5-5)$$

Damit die Anzahl der verfügbaren statischen Messwerte ermittelt werden kann, wird eine Zustandsvariable $v(k)$ eingeführt, die in binärer Form den Zustand eines Messwerts als *verfügbar* ($v(k) = 1$) oder *unverfügbar* ($v(k) = 0$) darstellt. Die Anzahl der statischen verfügbaren Messwerte $n_{A,S}$ eines Betrachtungszeitraums ergibt sich aus der aufsummierten Anzahl der Messwerte mit verfügbarer Integrität. Ein Messwert gilt als verfügbar, wenn die Größenwerte der Ortsabweichung $y(k)$ und der Protektionsgrenze $PG(k)$ kleiner als die vorgegebene Alarmgrenze sind. Sind die Ortsabweichung oder die Protektionsgrenze größer als die Alarmgrenze, ist die Integrität nicht gewährleistet. In mathematischer Form ist dies in Formel 5-6 dargestellt:

$$n_{IA,S} = \sum_{k=1}^K v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } y(k) > AG \vee PG(k) > AG \\ 1, & \text{wenn } y(k) < AG \wedge PG(k) < AG \end{cases} \quad (5-6)$$

Bei statischer Betrachtung der Integritätsverfügbarkeit wurde die Zeit bis zum Alarm nicht berücksichtigt. Die dynamische Integritätsverfügbarkeit $I_{A,d}$ berechnet sich aus der Anzahl der dynamischen verfügbaren Integritätswerte $n_{IA,D}$ und der gesamten Anzahl der Messwerte K für den Betrachtungszeitraum nach

$$I_{A,d} = \frac{n_{IA,D}}{K}, \text{ mit } I_{A,d} \in [0,1]. \quad (5-7)$$

In der Gleichung steht $n_{IA,D}$ für die Anzahl der aufsummierten dynamischen verfügbaren Messwerte. Diese wird anhand der binären Zustandsvariablen $v(k)$ ermittelt und gibt an, ob die Anforderung an die dynamische Integritätsverfügbarkeit erfüllt ist. Dabei erfüllt ein Messwert die Bedingungen der dynamischen Integritätsverfügbarkeit, wenn mindestens ein Messwert aus der Messhistorie (Länge ergibt sich aus der Zeit bis zur Alarm-Anforderung, multipliziert mit der Messfrequenz) als verfügbar gilt. Die Anzahl der Messwerte, die in der Zeit bis zum Alarm die Bedingungen der Integritätsverfügbarkeit erfüllen, wird im Folgenden mit $n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k}$ symbolisiert. Die Anzahl der dynamischen verfügbaren Messwerte bestimmt sich nach

$$n_{A,D} = \sum_{k=1}^K v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k} = 0 \\ 1, & \text{wenn } n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k} > 0 \end{cases} \quad (5-8)$$

in der $n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k}$ die Anzahl der verfügbaren Messwerte in der Zeit bis zum Alarm für Messwert k darstellt. Die Anzahl der verfügbaren Messwerte berechnet sich gleich der statischen Integritätsverfügbarkeitsbetrachtung für den Alarmzeitraum. Die dynamische verfügbare Integrität für einen Messwert k bestimmt sich nach

$$n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k} = \sum_{k-TTA \cdot f}^k v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } y(k) > AG \vee PG(k) > AG \\ 1, & \text{wenn } y(k) < AG \wedge PG(k) < AG \end{cases} \quad (5-9)$$

5.4.4.2 Integritätsunverfügbarkeit

Die Häufigkeit der Integritätsunverfügbarkeit wird ähnlich der Integritätsverfügbarkeit bestimmt. Sie kann sowohl statisch als auch dynamisch unter Berücksichtigung der Zeit zum Alarm quantifiziert werden. Eine Messung gilt als unverfügbar, wenn die Protektionsgrenze einen größeren Wert als die Alarmgrenze annimmt. Die Integritätsunverfügbarkeit berechnet sich aus der Integritätsverfügbarkeit durch:

$$I_{UA,S} = 1 - I_{A,S}, \text{ mit } I_{UA,S} \in [0,1]. \quad (5-10)$$

Gleiches gilt für die Häufigkeit der dynamischen Integritätsunverfügbarkeit $I_{UA,D}$. Diese ermittelt sich ähnlich der statischen Integritätsunverfügbarkeit nach:

$$I_{UA,d} = 1 - I_{A,d}, \text{ mit } I_{UA,d} \in [0,1]. \quad (5-11)$$

5.4.4.3 Gefährlicher Betriebszustand (verpasster Alarm)

Der gefährliche Betriebszustand ist der schwerwiegendste Systemzustand. Tritt dieser Zustand auf, löst das System keinen Alarm aus, obwohl der Größenwert der Ortsabweichung größer als der der Alarmgrenze ist. Die relative Eintrittshäufigkeit eines gefährlichen Betriebszustands (engl. Integrity Risk) errechnet sich aus der Anzahl der gefährlichen Betriebszustände dividiert durch die Gesamtanzahl der Messwerte [vgl. European GNSS Agency 2014b: 45]:

$$I_{GB,s} = \frac{n_{IGB,s}}{K}, \text{ mit } I_{GB,s} \in [0,1]. \quad (5-12)$$

In der Gleichung symbolisiert $n_{IGB,s}$ die Anzahl von Messwerten, bei denen die Bedingungen eines gefährlichen Betriebszustands erfüllt sind. $n_{IGB,s}$ bestimmt sich aus der Aufsummierung der Systemzustände, bei denen der Größenwert der Ortsabweichung größer als der der Alarmgrenze ist, jedoch der Größenwert der Protektionsgrenze kleiner als der der Alarmgrenze ist. Werden die Bedingungen nicht erfüllt, wird die Hilfsvariable $v(k)$ den Wert null einnehmen:

$$n_{IGB,s} = \sum_{k=1}^K v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 1, & \text{für } y(k) > AG \wedge PG(k) < AG \\ 0, & \text{für } y(k) < AG \vee PG(k) > AG \end{cases} \quad (5-13)$$

Ebenso wie die Integritätsverfügbarkeit und die Systemverfügbarkeit kann auch die relative Häufigkeit des Eintreffens des gefährlichen Betriebszustandes unter Berücksichtigung der Zeit bis zum Alarm bestimmt werden. Dabei ergibt sich die relative Häufigkeit eines gefährlichen dynamischen Betriebszustands aus der Anzahl der gefährlichen Betriebszustände $n_{IGB,d}$ und der Anzahl der Messwerte:

$$I_{GB,d} = \frac{n_{IGB,d}}{K}, \text{ mit } I_{GB,d} \in [0,1]. \quad (5-14)$$

Die Anzahl der als im gefährlichen Betriebszustand zu bewertenden Messwerte wird mithilfe der Hilfsvariablen $v(k)$ über den Zeitraum der Zeit bis zum Alarm aufsummiert.

$$n_{IGB,d} = \sum_{k=1}^K v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 0, & \text{für } n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k} > 0 \\ 1, & \text{für } y(k) < PG(k) \wedge y(k) > AG \wedge n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k} = 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

In der Gleichung steht $n_{A,k-TTA \cdot f \rightarrow k}$ für die Anzahl verfügbarer Messwerte in der Zeit bis zum Alarm. Diese werden entsprechend Formel 5-9 bestimmt.

5.4.4.4 Weitere Integritätsmaße

Es sind weitere Merkmale zur Integritätsbestimmung denkbar, die zur Informationssteigerung bei der Qualifizierung hilfreich sein könnten, wie beispielsweise die noch nicht bestimmten einzelnen Flächen aus dem Stanford-Diagramm. Diese könnten sowohl im Hinblick auf statische als auch auf dynamische Integrität betrachtet werden. Auch das Verhalten des Alarms, insbesondere die Falschalarmhäufigkeit oder die Häufigkeit eines irreführenden, korrekten Betriebszustands, können Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Darüber hinaus sind die mittleren Zeitintervalle zwischen einzelnen Alarmen oder Fehlalarmen bei der Qualifizierung von Bedeutung. Durch die Untersuchung bestimmter Prüffälle wurde in [DO-229-D] bereits die Wahrscheinlichkeit der Identifikation von Sonderzuständen, wie das Fehlverhalten eines Satelliten, beziffert.

Die Untersuchung aller denkbaren Maße zur Bestimmung der Ortsintegrität würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Je nach Anwendungsbereich ergeben sich in der Praxis sehr unterschiedliche Anforderungen an die Zeit bis zum Alarm und an die Genauigkeit der Integrität. Für die verschiedenen Anwendungen werden diese im weiteren Verlauf dargestellt.

In der Luftfahrt wird beim Reiseflug eine Zeit bis zum Alarm von 10 s definiert [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014: 4–11]. Für den automatisierten Landeanflug wird das Zeitintervall auf 6 s reduziert [vgl. International Civil Aviation Organization 2006]. Die 6 s resultieren aus der Zeit, die für die Identifikation eines fehlerhaften Satelliten benötigt wird und der Datenübertragungszeit zum Empfänger im Flugzeug.

Im Bahnbereich wurden die Anforderungen an die Alarmgrenze und die Zeit bis zum Alarm durch das GNSS-Rail Advisory Forum für verschiedene Streckenprofile spezifiziert [vgl. GNSS Rail Advisory Forum 2014]. Als Zeit bis zum Alarm wurde streckenunabhängig ein Zeitintervall kleiner eine Sekunde definiert [vgl. GNSS Rail Advisory Forum 2014; Zheng/Cross 2012]. Im Gegensatz dazu wurde eine Zeit bis zum Alarm von 6 s für das amerikanische Zugleitsystem *Positive-Train-Control* festgelegt [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014].

Im Straßenverkehr werden die Zeiten bis zum Alarm von der jeweiligen Anwendung abhängig gemacht. Im Fall der Navigation, der Führung von Fahrzeugen und dem Kollisionsschutz werden Zeiten bis zum Alarm von 5 s bestimmt. Eine Zeit bis zum Alarm von bis zu 30 s wird beispielsweise bei der Unfallortsbestimmung definiert. [vgl. U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014].

Ob diese Angaben bezüglich der Zeit bis zum Alarm auf das automatisierte bis autonome Fahren übertragen werden können, ist fraglich. Denn ein regelmäßiger Blindflug von bis zu 5 s in einem Fahrzeug auf der Autobahn erscheint nicht vereinbar mit dem derzeitigen Sicherheitsanspruch.

5.4.5 Überlebensfähigkeit (engl. *Continuity*)

Die Überlebensfähigkeit eines Systems wird in [DO-229-D, S. 13] definiert als:

„...the ability of the total system (...) to perform its function without interruption during the intended operation.“ [RTCA DO-229, 2006, S. 13].

Aus der Definition geht hervor, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit die Fähigkeit eines Systems ist, die spezifizierten Anforderungen ohne Unterbrechung für einen Prüffall oder für ein bestimmtes Manöver einzuhalten. Ein Manöver beschreibt ein typisches Fahrereignis wie z. B. einen Ausscher- oder Überholvorgang. Der komplementäre Zustand der Überlebensfähigkeit ist die Ausfallwahrscheinlichkeit [vgl. Schnieder/Schnieder 2013]. Dabei führen sowohl ein fehlerhafter als auch ein korrekter Alarm zum Abbruch der Überlebensfähigkeit [vgl. IEC 61108-1]. Damit die Anforderungen erfüllt sind, müssen die Ortsabweichungen kleiner als die geforderte Ortsqualität und die Integrität durchgehend verfügbar sein. In IEC 60050 werden dabei explizit die Messbedingungen in die Bewertung der Überlebensfähigkeit einbezogen [vgl. IEC 60050]. Die Überlebenswahrscheinlichkeit lässt sich über die Formel

$$C = \frac{n_C}{N_m} \text{ mit } C \in [0,1] \quad (5-16)$$

bestimmen. In der Formel beziffert n_C die Anzahl von erfolgreichen Manövern m und N_m die Gesamtanzahl der absolvierten Manöver. Die erfolgreich absolvierten Manöver bestimmen sich nach

$$n_C = \sum_{i=1}^I v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 0, & n_{A,m} = 0 \\ 1, & n_{A,m} > 0 \end{cases} \quad (5-17)$$

in der $n_{A,m}$ die Verfügbarkeitshistorie der Messwerte über das Manöver darstellt. Sie berechnet sich nach

$$n_{A,m} = \sum_{k_m}^{K_m} v(k), \text{ mit } v(k) = \begin{cases} 1, & y(k) < AG \wedge PG(k) < AG \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5-18)$$

Wurden ausreichend Manöver absolviert und ist die Grundgesamtheit der Überlebenswahrscheinlichkeit bekannt bzw. kann sie aus den Messwerten abgeleitet werden (in der Regel eine Verteilung aus der Exponentialfamilie [vgl. Jörg Müller 2012]), können die Überlebenswahrscheinlichkeit und die Ausfallwahrscheinlichkeit für definierte Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird oft synonym mit der Zuverlässigkeit (engl. *Reliability*) verwendet, jedoch gibt es kleine Differenzen (für eine vertiefte Analyse der Termini siehe [Lu/Schnieder 2014]).

5.4.6 Ortsverfügbarkeit (engl. *Availability*)

Verfügbarkeit definiert sich als der Zeitanteil in Prozent, zu dem ein Messwert zur Verfügung steht. Dabei variieren jedoch die Anforderungen an die Verfügbarkeit eines Messwertes. In EN 16803-1 gilt ein Messwert als verfügbar, wenn der Prüfgegenstand einen Ortswert bereitstellt [vgl. DIN EN 16803-1]. Nach Wegener ist ein Messwert hingegen verfügbar, wenn die Ortsabweichung des Messwerts klei-

ner als die geforderte Genauigkeit ist [vgl. Wegener 2013]. In der Luftfahrt wird für die Ortsverfügbarkeitsbetrachtung zusätzlich die Integritätsverfügbarkeit herangezogen. Erdnahe Einflüsse werden bei der Ortsverfügbarkeit in der Luftfahrt nicht berücksichtigt [vgl. European GNSS Agency 2014b]. In dieser Arbeit wird die Ortsverfügbarkeit definiert als:

„The availability of a navigation system is the ability of the system to provide the required function and performance at the initiation of the intended operation.“ [DO-229-D, S. 13].

Dabei handelt es sich um eine Form der Punktverfügbarkeit, wie sie bereits zuvor definiert wurde [vgl. Wegener 2013]. Diese Definition deckt sich auch mit der Definition aus der IEC 60050, in der explizit Messbedingungen berücksichtigt werden [vgl. IEC 60050].

Die Ortsverfügbarkeit kann anhand der Merkmale der mittleren Verfügbarkeit, der Punktverfügbarkeit und der stationären Verfügbarkeit unterteilt werden [vgl. Jörg Müller 2012; IEC 60050]. Die Punktverfügbarkeit wird genau *für einen Zeitpunkt* definiert, wohingegen die mittlere Verfügbarkeit für ein Zeitintervall spezifiziert ist. Die stationäre Verfügbarkeit bezieht sich auf den Betrachtungsraum der Unendlichkeit. Die Punktverfügbarkeit wird als relative Häufigkeit dargestellt. Die relative Häufigkeit der Verfügbarkeit von Messdaten lässt sich aus der Anzahl der möglichen Messwerte n_{pK} und der Anzahl der verfügbaren Messwerte $n_{A,S}$ berechnen. Sie wird bestimmt nach:

$$A_t = \frac{n_{A,S}}{n_{pK}}. \quad (5-19)$$

Um die Punktverfügbarkeit zu ermitteln, muss zwischen den möglichen, den vorhandenen und den verfügbaren Werten unterschieden werden. Die Anzahl möglicher Messwerte ergibt sich aus dem Messintervall T und der Aktualisierungsfrequenz des Prüfgegenstands f . Liefert das System einen Messwert zu einem bestimmten Zeitpunkt, ist dieser Wert vorhanden. Erfüllt dieser Messwert spezifizierte Anforderungen hinsichtlich Ortsabweichung und Integrität, ist er verfügbar. Die Anzahl verfügbarer Messwerte $n_{A,S}$ bestimmt sich nach Gleichung 5-6.

Die Ortsverfügbarkeit und die Integritätsverfügbarkeit können anhand der möglichen Messwerte unterschieden werden. Während bei der Ortsverfügbarkeit die Anzahl an möglichen Messwerten aus dem Zeitintervall und der Messfrequenz bestimmt wird, berechnet sich die Integritätsverfügbarkeit aus der Anzahl der Messwerte, die vom GNSS-Empfänger bereitgestellt werden und die Integritätsanforderungen erfüllen.

5.5 Weitere Qualitätsmaße zur Qualifizierung von Ortungssystemen

Über die Qualitätsmaße der Genauigkeit, Integrität, Überlebensfähigkeit und Verfügbarkeit hinaus sind verschiedene weitere Qualitätsmaße von Bedeutung. Die Qualitätsmaße der Akquisitionszeit, Ortungs-
latenz und Ortsgenauigkeit unter Berücksichtigung der Ortungslatenz werden in diesem Unterkapitel eingeführt.

5.5.1 Ortsakquisitionszeit

Die Ortsakquisitionszeit beschreibt das Zeitintervall von der Versorgung des Prüfgegenstandes mit Elektrizität und Eingangssignalen bis zur erstmaligen Erfüllung spezifizierter Anforderungen [vgl. ION STD 101]. Die spezifizierten Anforderungen (Anforderung an die Ortsgenauigkeit und die Protektionsgrenze) sind anwendungsabhängig und variieren stark. Ein exemplarischer Verlauf ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

Die Ortsakquisitionszeiten werden in einem Histogramm dargestellt und mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angenähert. Anschließend können die mittlere Ortsakquisitionszeit und die Ortsakquisitionszeitpräzision bestimmt werden. Des Weiteren lässt sich die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit denen Ortsakquisitionszeiten auftreten.

Verschiedene Ortsakquisitionszeiten sind möglich. Sie basieren auf der möglichen Datenzwischenspeicherung im GNSS-Empfänger. Im Bereich der satellitenbasierten Ortung sind drei Ortsakquisitionszeiten von Relevanz: der Kaltstart, der Warmstart und der Heißstart [vgl. ION STD 101].

Der Kaltstart umschreibt das Zeitintervall zwischen der elektrischen Versorgung eines GNSS-Empfängers ohne zwischengespeicherte Daten und der ersten Ortsausgabe, die mit einer spezifizierten minimalen Genauigkeit erfolgt [vgl. ION STD 101].

Der Warmstart umfasst das Zeitintervall, dass der GNSS-Empfänger benötigt, um mit zwischengespeicherten Daten nach der elektrischen Versorgung die erste Ortsausgabe mit der minimalen spezifizierten Messgenauigkeit auszugeben [vgl. IEC 61108-1; ION STD 101].

Die Heißstart beschreibt das Zeitintervall, das ein GNSS-Empfänger benötigt, um nach Aus- und Einschalten der Spannungsversorgung Ortsinformationen mit der minimal spezifizierten Messgenauigkeit bereitzustellen [vgl. ION STD 101].

5.5.2 Ortungslatenz

Messergebnisse zeitvarianter Messungen müssen einen zeitlichen Bezug aufweisen (im Unterschied zu zeitinvarianten Messergebnissen). Folglich ist die zeitliche Verzögerung der Bereitstellung der Messwerte ein Qualitätsmerkmal eines GNSS-Empfängers. Die Ortungslatenz definiert das Zeitintervall ab dem Start einer einzelnen Messung (interner oder externer Auslöser) bis zur Bereitstellung des Messer-

gebnisses an einer Schnittstelle für den Endnutzer. Die Ortungslatenz wird dabei lediglich um die zeitliche Verzögerung der Schnittstelle auf der Nutzerseite bereinigt. Die Ortungslatenz $t_{\Delta}(k)$ für einen Messwert lässt sich formulieren als:

$$t_{\Delta}(k) = t_{\text{Bereitstellung}}(k) - t_{\text{Auslöser}}(k) - t_{\Delta, \text{Schnittstelle Benutzer}}(k) \quad (5-20)$$

Das Merkmal der Ortungslatenz wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion – die Ortungslatenzfunktion – charakterisiert. Bei einer Messreihe mit annähernd gleichen Größenwerten für die Ortungslatenz kann diese vereinfacht durch den arithmetischen Mittelwert dargestellt werden.

Die Ortungslatenz wird durch verschiedene Einstellungen des GNSS-Empfängers beeinflusst. Versuche haben gezeigt, dass softwareseitige Einstellungen (z. B. Anzahl der berücksichtigten GNSS) und hardwareseitige Einstellungen (z. B. Anzahl der belegten Schnittstellen) einen Einfluss auf den Größenwert der Ortungslatenz besitzen. Dies macht eine genaue Definition des Prüfgegenstands unabdingbar [vgl. Spiegel/Becker 2015].

5.5.3 Ortsgenauigkeit unter Berücksichtigung der Ortungslatenzverzerrung

Wird ein Messergebnis als Grundlage einer Datenfusion genutzt, ist in Abhängigkeit vom Fusionsalgorithmus der Zeitpunkt der Bereitstellung der Ortsdaten an der Rechenplattform bedeutend. Für diesen Fall ergibt sich die kombinierte Messabweichung aus der unmittelbaren (statischen Fall) Messabweichung $\Delta \mathbf{y}_s$ und der Messabweichung durch die zeitlich verzögerte Bereitstellung $\Delta \mathbf{y}_d$. Die Messabweichung durch die verzögerte Bereitstellung wird in diesem Dokument als Ortungslatenzverzerrung bezeichnet [vgl. Spiegel/Becker 2015]. Das Messergebnis wird in diesem Fall korrigiert, daher verbessert, da der Referenzaufbau einen zusätzlichen Einfluss (Latenz) berücksichtigt und das Messergebnis genauer wird. Die Messqualität des Prüfgegenstands wird durch die Berücksichtigung der Latenz verzerrt. Die statische Messabweichung und die Ortungslatenzverzerrung sind in Abbildung 5-14 dargestellt. Zu dem Zeitpunkt der Auslösung ist das Fahrzeug an dem Ort $\hat{\mathbf{y}}_{\text{Ref}}(t_{\text{Auslöser}})$ (rechtes Fahrzeug in der Abbildung) und besitzt die Messabweichung $\Delta \mathbf{y}_s$. Durch die Berechnungsdauer der Algorithmen und die Bewegung des Fahrzeuges steht der Ort erst zu dem Zeitpunkt der Bereitstellung bereit (linkes Fahrzeug in der Abbildung). Während der Ortungslatenzdauer hat sich das Fahrzeug auf den Ort der Bereitstellung weiterbewegt (linkes Fahrzeug im Bild) und die Messabweichung ist um den dynamischen Anteil angestiegen.

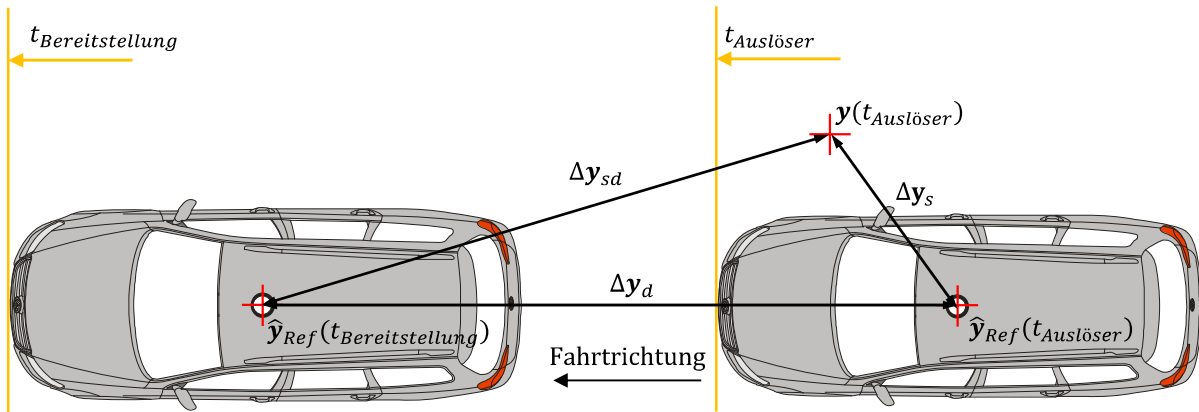


Abbildung 5-14: Einfluss der Latenz auf die Ortungsqualität für eine geradlinige Bewegung

Dabei ist offensichtlich, dass die Latenzverzerrung von der Geschwindigkeit des Fahrzeuges abhängt. Ist die Geschwindigkeit hoch, legt das Fahrzeug eine große Distanz zurück und die Latenzverzerrung ist groß. Ist die Geschwindigkeit gleich null, ist die Latenzverzerrung ebenfalls null. Die kombinierte Messabweichung lässt sich durch

$$\Delta \mathbf{y}_{sd} = \Delta \mathbf{y}_s + \Delta \mathbf{y}_d \quad (5-21)$$

berechnen. In der Gleichung wird die statische Messabweichung durch $\Delta \mathbf{y}_s$ und die Latenzverzerrung durch $\Delta \mathbf{y}_d$ dargestellt. Die kombinierte Messabweichung kann zusätzlich zu der vektoriellen Darstellung aus Gleichung 5-21 in skalarer Darstellung erfolgen.

Damit die Latenzverzerrung berechnet werden kann, ist ein Referenzwert erforderlich, der gleichzeitig mit der Bereitstellung der Ortsinformationen gültig ist. Da durch die deterministisch arbeitenden Referenzmesssysteme nicht zwingend ein Referenzwert zu dem Zeitpunkt der Bereitstellung vorhanden ist, muss dieser durch Interpolation gewonnen werden. Dabei ist der Einfluss der Messunsicherheit auf die Genauigkeit der Referenz durch die Interpolation klein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für Fahr-situationen, in denen große Querdynamiken herrschen, geringe absolute Fahrzeuggeschwindigkeiten vorhanden sind.

Die kombinierte Messabweichung wird für Messreihen im Histogramm aufgetragen und kann durch eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung approximiert werden. Bedingt durch die Latenzverzerrung verliert die Verteilungsfunktion das symmetrische Erscheinungsbild. Auf Basis der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann anschließend die Wahrscheinlichkeit für einen Grenzwert berechnet werden.

5.6 Darstellung der Qualitätsmerkmale in Attributhierarchieform

Die hier behandelten Qualitätsmerkmale werden in hierarchischer Beschreibungsstruktur in Abbildung 5-15 dargestellt. Methodisch wird nach dem von Schnieder entwickelten Schema der Attributhierarchie, welche in die Richtlinie VDI 4005 Blatt 5 übertragen wurde, vorgegangen [vgl. Schnieder 2010; Verein

Deutscher Ingenieure e. V. 2017]. Für die Abbildung wurde, wie bei Schnieder, auf das Beschreibungsmittel UML-Klassendiagramm aufgrund der Eindeutigkeit und der einprägsamen Darstellungsform zurückgegriffen [vgl. Schnieder 2010].

Die Hierarchie ist dabei in die Ebenen *Begriff*, *Eigenschaft*, *Merkmal*, *Größe*, *Werte* und *Einheiten* strukturiert (von oben nach unten). Die *Eigenschaften* haben dabei einen qualitativen Charakter, die *Merkmale* sind teilweise qualitativ und quantitativ, die Größen quantitativ. Aus Abbildung 5-15 geht hervor, dass sich die Messqualität des Empfangssystems durch die Eigenschaften der Ortsgenauigkeit, Wiederholbarkeit, Integrität, Überlebensfähigkeit, Ortsverfügbarkeit und Ortungslatenz beschreiben lässt. Die verschiedenen Eigenschaften können wiederum durch Merkmale und Größen beschrieben werden, die durch einen Wert und durch eine Einheit formal definiert werden können. In der Abbildung wurden die Größen, die für parameterabhängige Verteilungen gültig sind, dargestellt. Eine Darstellung für nicht-parametrisch verteilte Messwerte ist aber ebenso denkbar.

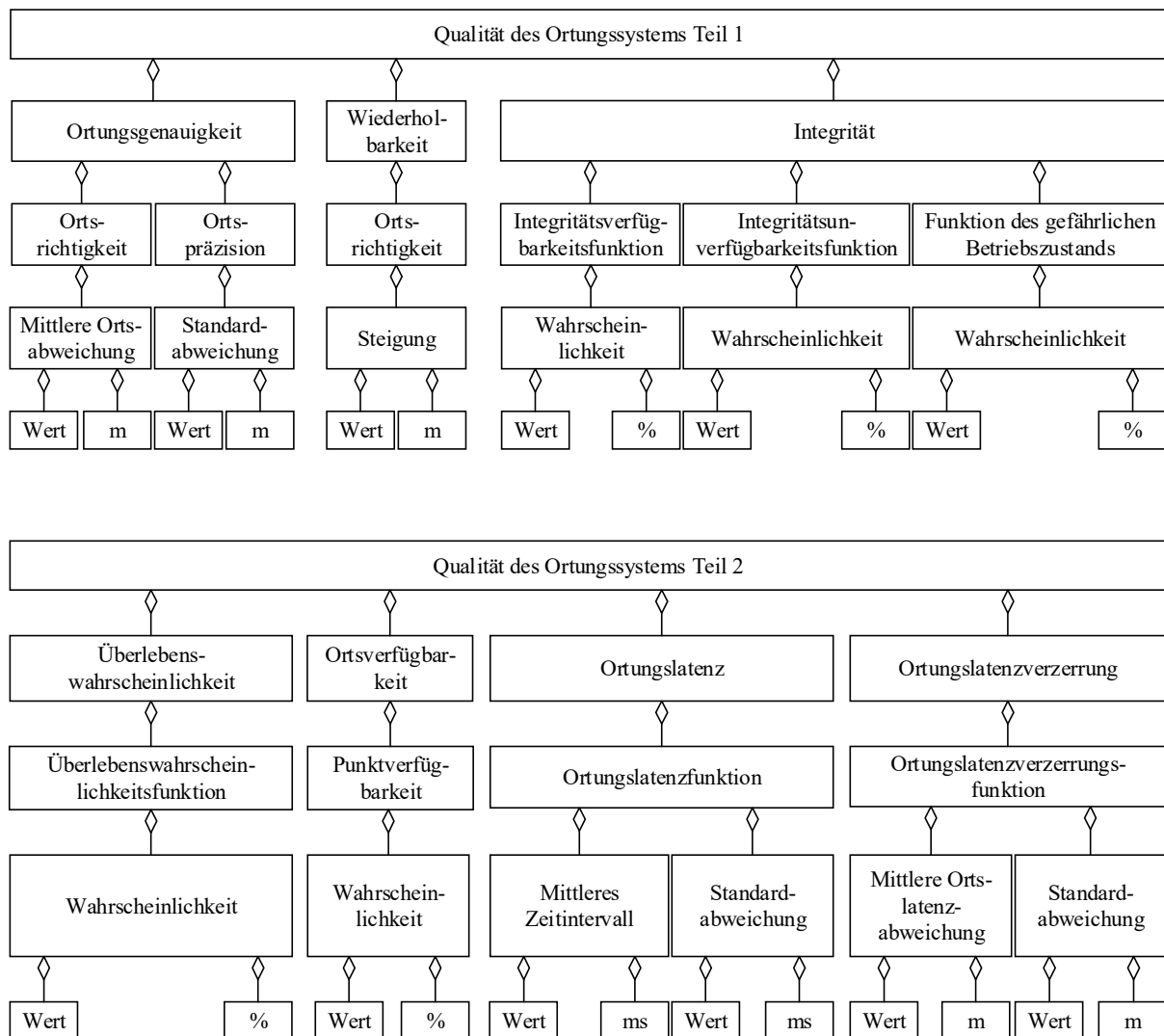


Abbildung 5-15: Attributhierarchie der Kenngrößen zur Bewertung von Ortungssystemen

6 Einführung und Modellierung eines Merkmals zur Quantifizierung der Messbedingung

Messbedingungen beeinflussen die Messung und dadurch das Messresultat. Oft ist der Einfluss der Messbedingungen auf das Messresultat vernachlässigbar klein. Im Kontext von GNSS-Messungen haben die Messbedingungen (erdnahe als auch systemische) einen besonders großen Einfluss auf das Messresultat. Ohne eine ausreichende Dokumentation der Messbedingungen ist das Messresultat wenig aussagekräftig und verliert an Bedeutung. Aus diesem Grund fordert die DIN EN ISO/IEC 17025 die Dokumentation der Messbedingungen. Um diesen Anspruch zu erfüllen, wird in diesem Kapitel ein Merkmal eingeführt, dass die Messbedingungen während der Messung beschreibt. Bedingt durch die Vielzahl der Einflüsse, die auf die GNSS-Messungen wirken, ist eine Darstellung in Form der einzelnen Einflüsse nicht hilfreich. Aus diesem Grund ist das Hauptziel in diesem Kapitel, ein Merkmal zu entwickeln, dass die Messbedingungen in einer Größe verdichtet. Dies ermöglicht unabhängigen Dritten, die nicht bei der Prüfung zugegen waren, die Umstände, unter denen die Prüfung durchgeführt wurde, nachzuvollziehen.

Infolgedessen wird in diesem Kapitel ein vom Autor entwickeltes Merkmal zur Quantifizierung der Messbedingungen eingeführt, definiert und interpretiert. Das Merkmal wird bestmöglicher Ort (bmO) benannt und fasst die gesamten Einflüsse in einer einzigen Größe zusammen. Weil das Merkmal von der Empfängertechnologie abhängt, wird auf die Kopplung zwischen Empfänger und Merkmal eingegangen und anschließend eine Klassifizierung von GNSS-Empfängern vorgenommen. Darauf folgend wird ein Modell zur Berechnung des Merkmals entwickelt. Da die Modelleingangsgrößen streuen, wird im Anschluss eine Messunsicherheitsanalyse durchgeführt. Dies ermöglicht einen hohen Grad des Vertrauens in die Merkmalgröße. Abschließend wird das Kapitel resümiert und Erkenntnisse aus dem Merkmal gezogen.

6.1 Definition des bestmöglichen Orts

In Abschnitt 4.2 wurden die Anforderungen aus der DIN EN ISO/IEC 17025 an die Dokumentation der Messbedingungen identifiziert und Unschärfen bei heutigen Prüfprozeduren aufgedeckt. Da im Kontext von GNSS-Messungen viele verschiedene Einflüsse auf das Messergebnis wirken und eine Darstellung einzelner Einflüsse keine genauen Rückschlüsse auf die Messbedingungen zulässt, wird an dieser Stelle ein neues Merkmal eingeführt, indem die gesamten Einflüsse auf die Genauigkeit des Messergebnisses in einer einzelnen Größe verdichtet sind. Das allgemeine Merkmal der bestmöglichen Prüfgröße (BG) (siehe Abschnitt 2.4) wird im Kontext der Ortung als der bestmögliche Ort (bmO) bezeichnet. Dieser ist definiert als

„ein Ort, der unter den Korrekturwert- und Korrekturmodellabweichungen durch einen perfekten Prüfgegenstand mit Standardalgorithmen hätte bestimmt werden können“.

Der bmO wird bei der Ortung als ein Vektor angenommen, der sich aus den Koordinaten des Orts in einem Koordinatensystem und dem dazugehörigen Gültigkeitszeitpunkt zusammensetzt. Diese Darstellung entspricht der Definition eines Orts aus Unterkapitel 2.7.

Durch die Annahme eines perfekten Prüfgegenstands soll die unbeeinflusste Dokumentation der Messbedingungen ermöglicht werden. Dabei wurde in der Definition des bmO explizit auf Standardalgorithmen gesetzt, um ein Minimum an Korrekturdaten und -modellen, die Hersteller in Prüfgegenständen hätten umsetzen können, festzulegen. Das Merkmal des bmO wird durch die Größen der bmO-Abweichung, der bmO-Streuung und der bmO-Messunsicherheit quantifiziert.

Der bmO soll anhand eines Beispiels bei der Längenmessung eingeführt werden. Ziel ist es dabei, die Qualität eines Korrekturmodells zur Wärmeausdehnung zu qualifizieren. Da die Messbedingungen in der Einheit erfolgen sollen, in der die Ausgangsgröße des Modells vorliegt, wird nicht der bestmögliche Ort sondern die bestmögliche Länge (bmL) in dem Beispiel berechnet.

Ein homogenes Stück Stahl wird, bevor es gemessen wird, auf Standardmessbedingungen gebracht. Wird der Stahl nicht heruntergekühlt (angenommen das Stück Stahl ist zu warm), weist er bedingt durch seinen Wärmeausdehnungskoeffizienten eine größere Länge auf. Ohne Kenntnis der genauen Temperatur zum Zeitpunkt der Messung kann nicht sicher festgestellt werden, wie lang das Werkstück ist.

Wenn keine Standardmessbedingungen vorhanden sind, würde die Dokumentation der Stahlstücktemperatur im Idealfall ermöglichen, die Länge des Stahlstücks auf Basis eines idealen Korrekturmodells zur Wärmeausdehnung auf Standardtemperaturen umzurechnen. Wäre die Temperatur (Korrekturwert) exakt gemessen, könnte die Länge des Stahls bei perfektem Korrekturmodell genau bestimmt werden. Ist eine Korrekturwertabweichung in der Temperaturmessung vorhanden, würde das Stahlstück länger bzw. kürzer berechnet werden. Diese Abweichung resultiert nicht aus dem Korrekturmodell, sondern aus dem fälschlich angenommenen Korrekturwert. Um die Qualität des Messmodells zu ermitteln, muss berechnet werden, wie lang das Werkstück für die genannte Eingangstemperatur hätte sein sollen.

Zur Berechnung der bmL werden folgende Größen benötigt:

- Korrekturwertabweichung ΔT , als Differenz zwischen dem Korrekturwert (δT_{Kor}) des Temperatursensors und dem dazugehörigen Referenzmesswert (δT_{Ref}).
- Referenzmesslänge (L_{Ref}), die darstellt, wie lang das Werkstück bei der Messung tatsächlich war,
- Wärmeausdehnungskoeffizient α .

Die bmL für das Stahlstück berechnet sich aus der Referenzmesslänge und der Längenänderung bedingt durch die Korrekturwertabweichung. Die bmL stellt die Länge dar, die unter Berücksichtigung der Korrekturwertabweichung hätte bestimmt werden können. Somit lässt sich vereinfacht die bmL nach

$$\text{bmL} = L_{\text{Ref}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (6-1)$$

berechnen. Die Größe bmL -Abweichung kann anschließend durch die Subtraktion der Referenzmesslänge um die bmL gebildet werden.

$$\text{Abweichung der } \text{bmL} = L_{\text{Ref}} - \text{bmL} = L_{\text{Ref}} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (6-2)$$

Die bmL ist bei der Satellitenortung identisch dem bmO . Lediglich die Anzahl der Einflüsse ist größer und die Berechnung komplizierter.

Damit der Einfluss der Messbedingungen direkt verständlich ist, wird der bmO auf der Größenebene in Form von Abweichungen dargestellt. Die Abweichungen des bmO zum Referenzort (bereitgestellt durch ein Referenzmesssystem) sind in Abbildung 6-1 durch Δf_x in Ost und Δf_y in Nord dargestellt. Durch die Darstellung der Ortsabweichung des Prüfgegenstands in Nord und Ost können diese direkt mit dem bmO verglichen werden. Ebenso ist es möglich die bestmöglichen weiteren Qualitätsmerkmale (z. B. bestmögliche Verfügbarkeit) aus Kapitel 5 zu berechnen.

Da der bmO auf der Basis von Referenzgrößen der einzelnen Einflüsse bestimmt wird und diese streuen, ist es erforderlich, den bmO um die Angabe einer Messunsicherheit in Form eines Überdeckungsreichs zu erweitern. Die Überdeckungsbereiche sind in Kreisform für den bmO und den Referenzort in Abbildung 6-1 dargestellt. Die Kreisform ist dabei nur exemplarisch ausgewählt.

Die Einführung des bmO ermöglicht es, die Qualität der Messbedingungen zusammenfassend darzustellen. Dabei bedeutet eine kleine Abweichung des bmO zu dem Referenzwert, dass die Messung unter guten Bedingungen erfolgt ist und es somit für die Algorithmen „einfacher“ war, einen genauen Ort zu schätzen. Im Gegensatz dazu sagt eine große Abweichung des bmO zum Referenzwert aus, dass die

Messung unter komplexen Messbedingungen stattgefunden hat und es somit „anspruchsvoller“ war, einen genauen Ort zu schätzen.

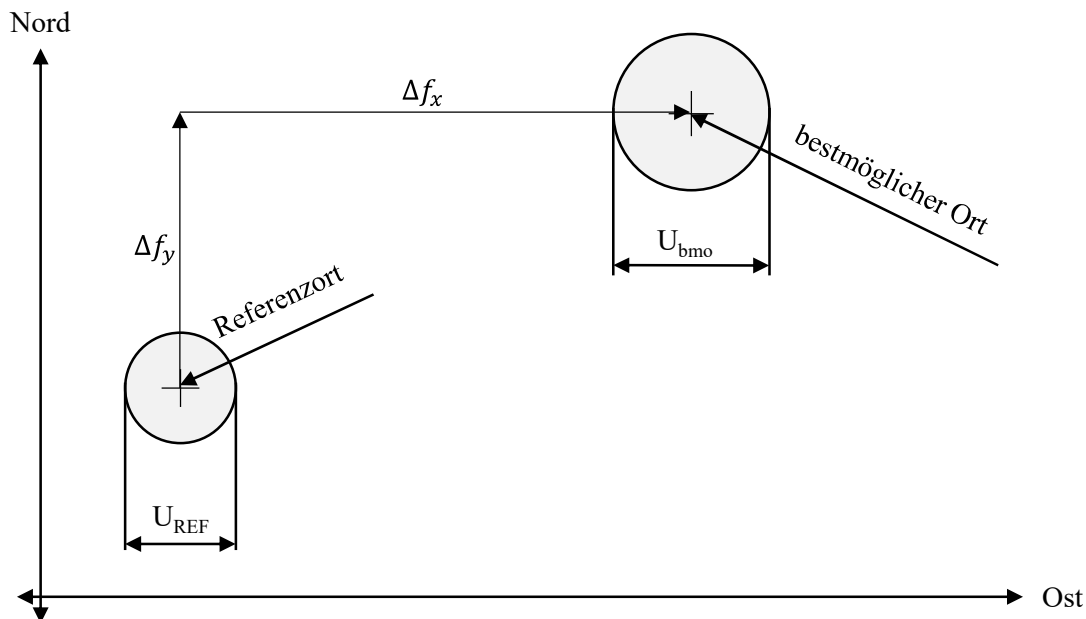


Abbildung 6-1: Bestmöglicher Ort und bestmögliche Ortsabweichung

Bei der Qualitätsermittlung ist es von Vorteil Messungen zu wiederholen. Liegt eine Messreihe vor, besteht das Resultat der Qualifizierung aus drei Trajektorien (siehe Unterkapitel 2.5). Dabei werden die diskreten Referenzmessungen in der Referenztrajektorie, die Messungen des Prüfgegenstands in der Prüftrajektorie und die einzelnen berechneten bmoOs in der bestmöglichen Ortstrajektorie (bmOT) zusammengefasst. In dem Fall der bmOT Fall setzt sich das Messergebnis aus der bmOT-Richtigkeit, bmOT-Präzision und der bmOT-Messunsicherheit zusammen. Dabei spiegeln geringe Ortspräzisionen (große Streuung) ein herausforderndes Prüfzenario wider mit stark variierenden Messbedingungen. Im Gegensatz dazu bedeuten hohe Ortspräzisionen (kleine Streuung), dass die Messbedingungen annähernd konstant waren und nur sehr geringen Änderungsraten unterlagen. Für die Größen der bmo-Ortsgenauigkeit gilt, dass die Messwerte durch die abhängige Parametermenge beschrieben werden können, sofern die bmo-Abweichungen einer bekannten Verteilungsform folgen. Folgen die Messwerte keiner Verteilungsform, können die bmo-Abweichungen durch die nicht-parametrische Statistik beschrieben werden.

Der Einfluss der Messbedingungen wird anhand der Attributhierarchie in Abbildung 6-2 dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Eigenschaft der Messbedingungen als abstrakter Begriff der Qualitätsermittlung durch den bmo quantitativ gefasst werden kann. Der bmo kann durch die Größen der bmo-Abweichung, der bmo-Präzision und der bmo-Messunsicherheit quantifiziert werden. Die drei Größen werden jeweils mit einem Wert und der dazugehörigen Einheit ausgedrückt.

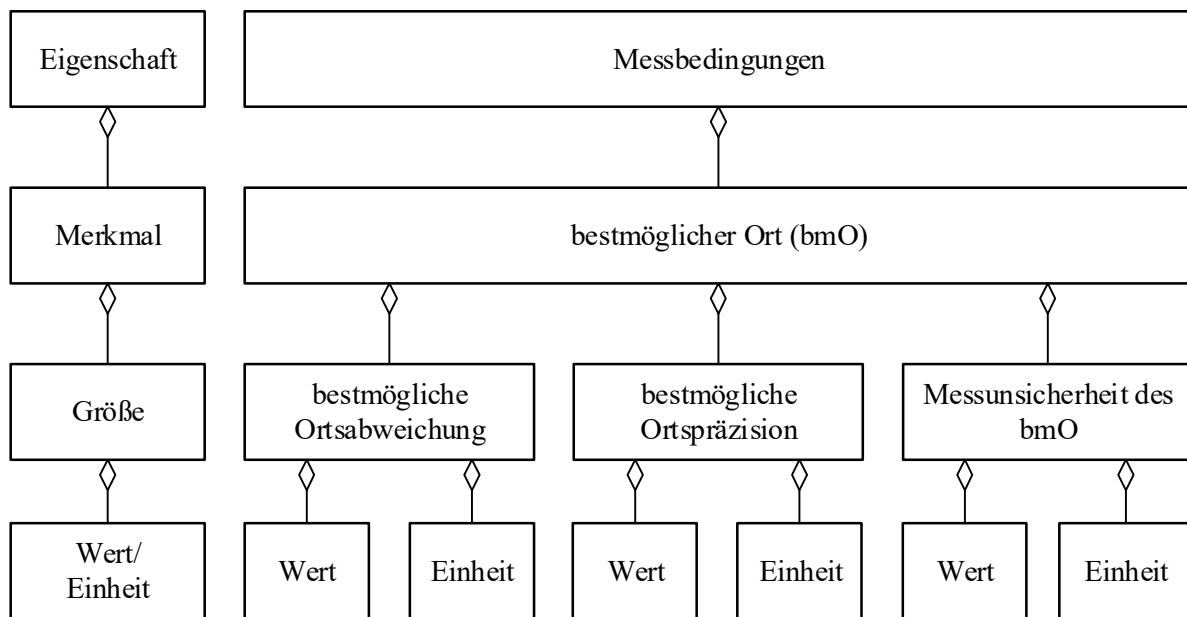


Abbildung 6-2: Hierarchische Darstellung des bestmöglichen Orts

Der Begriff des „bestmöglichen Orts“ wird dabei im übertragenen Sinn verstanden. Durch den Anspruch der Nachvollziehbarkeit und der Unabhängigkeit von einer Verkehrsdomäne und einem Fahrzeugmodell ist es denkbar, dass mit fortschrittlichen Fahrzeugmodellen und Algorithmen ein genauere Ort erzielt werden kann, weshalb der bmO nicht als Vergleichsgrundlage über Empfängerklassen hinweg genutzt werden sollte.

6.2 Kopplung bmO und Empfängerkonfiguration

Da Empfänger unterschiedlicher Qualität und auf Grundlage von verschiedenen Messprinzipien entwickelt wurden, ist der bmO abhängig von der Technologie des Empfängers und den verwendeten Korrekturdaten. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen:

Der bmO soll zeigen, was ein Empfänger anhand von Standardalgorithmen in der Empfängerklasse hätte zum Zeitpunkt der Messung berechnen können. Dieser Ort hängt stark vom Messprinzip des Prüfgegenstands ab. Ein C/A-Code-Empfänger ohne Korrekturdaten kann die Laufzeitverlängerung in der Ionosphäre lediglich anhand eines Modells schätzen und ist somit ungenau. Ein Mehrfrequenzempfänger kann durch die Linear-Kombination die Laufzeitverzögerungen sehr genau bestimmen. Folglich wären die Korrekturwertabweichungen für den Mehrfrequenzempfänger als vernachlässigbar anzunehmen, für den C/A-Code-Empfänger müssten diese jedoch berücksichtigt werden.

Dies führt dazu, dass der bmO für die verschiedenen Empfängerklassen unterschiedlich zu berechnen ist, da der bmO darstellen soll, was der Empfänger mit der gewählten Konfiguration und seinem Messprinzip hätte messen können. Der bmO für einen Mehrfrequenzempfänger wird stets geringere Abweichungen aufweisen als ein bmO für einen C/A-Code-Empfänger. Eine Vergleichbarkeit der Empfänger über den bmO ist somit nur in einer Klasse möglich.

In Tabelle 6-1 sind verschiedene Empfängertypen in Klassen kategorisiert. Dabei wurden drei verschiedene Kategorien identifiziert: die unterstützten GNSS (aus Übersichtlichkeitsgründen wurde hier auf eine Darstellung der verschiedenen Frequenzen verzichtet), das Messprinzip und die verwendeten Korrektursignale. Ein Empfänger der einfachsten Klasse nutzt NAVSTAR-GPS Satelliten, führt ein C/A-Code-Tracking durch und schätzt den Einfluss der Ionosphäre anhand des Alpha- und Beta-Parameters aus der Navigationsnachricht und den Einfluss der Troposphäre anhand des Standardatmosphärenmodells. Ein Empfänger höchster Qualität unterstützt mehrere GNSS, führt eine Mehrfrequenz-Phasenlösung durch und wird mit präzisen RTK-Korrekturdaten versorgt.

Tabelle 6-1: Klassifizierung von Messprinzipien

	unterstützte GNSS				Messprinzip			Korrektursignale			
Klasse	GPS	Gali- leo	Glon- ass	Beidou	SPS	PPS	...	N- File	SBAS	RTK	...
1	x				x			x			
2	x				x				x		
	...										
N	x	x	x	x		x				X	

6.3 Modellierung der Messbedingung und Schätzung des bestmöglichen Orts

In diesem Abschnitt wird die Modellierung der Messbedingungen und die Schätzung des bmO beschrieben. Dabei gilt, dass die ausgewählten Algorithmen und Verfahren zur Bestimmung der Referenzwerte der einzelnen Einflüsse vom Prüfaufbau abhängig sind und durch weitere Verfahren substituiert werden können. Basierend auf Referenzwerten der vorliegenden Messbedingungen und der Korrekturwertabweichungen wird anschließend der bmO geschätzt. Der systematische Ablauf bei der Berechnung des bmO ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

Ausgehend von einem Messmodell und einem Referenzort und –zeit können als Basis für die Berechnung die geometrischen Distanzen zu den Satelliten ermittelt werden. Anschließend werden die Korrekturwertabweichungen aus den Referenzwerten der Einflüsse und den im Prüfgegenstand ermittelten Korrekturdaten gebildet. Die geometrische Distanz und die Korrekturwertabweichungen werden anschließend aufsummiert und die Berechnung des bmO durchgeführt. Die Schritte der Transformation in ein weiteres Koordinatensystem entfallen in diesem Abschnitt. Zum Abschluss wird auf die vorläufige Berechnung der bmO-Abweichung eingegangen. Es ist nur eine vorläufige Berechnung möglich, da die bmO-Abweichungen anschließend durch die systematischen Abweichungen, die durch die Messunsicherheitsanalyse (Unterkapitel 6.4) bestimmt werden, korrigiert werden müssen. Einzelne Iterations Schleifen, u. a. zur Berechnung der Elevations- und Azimutwinkel, ausgehend vom Referenzort, sind in der folgenden Darstellung nicht berücksichtigt.

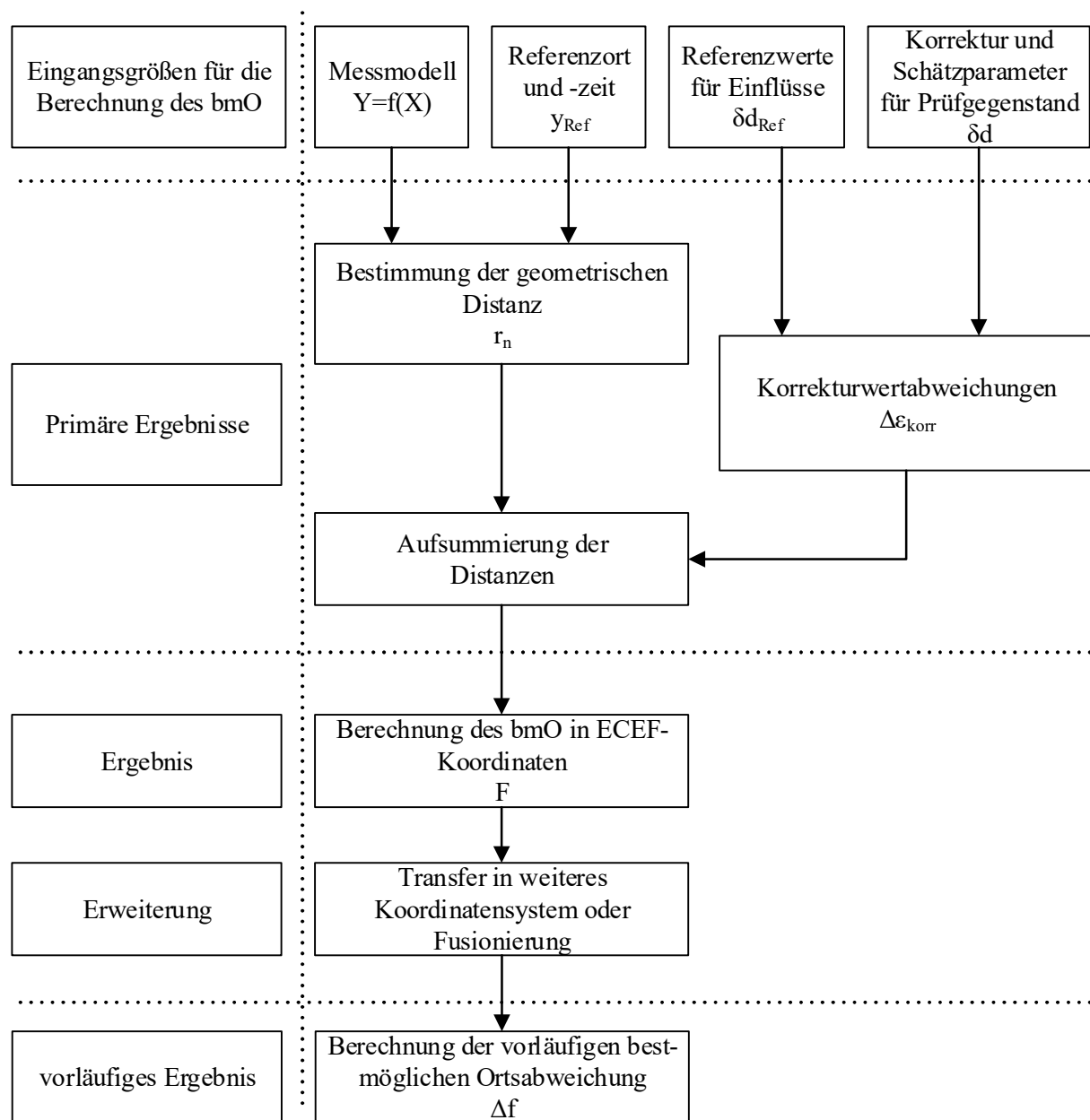


Abbildung 6-3: Generalisierte Darstellung des allgemeinen Vorgehens bei der Berechnung des best-möglichen Orts

6.3.1 Modellierung der für den Empfänger messbaren geometrischen Empfängerantennen-Satellitenantennen Distanz

Ziel der Modellierung ist die Bestimmung des bmO, ausgedrückt in einem kartesischen Koordinatensystem $(x_{bmO,ECEF,t}, y_{bmO,ECEF,t}, z_{bmO,ECEF,t})$ zu einem bestimmten Zeitwert t . Dabei beschreibt der Index bmO den Ort des Antennenzenrums des Nutzers in $ECEF$ -Koordinaten. Der bmO wird anhand einer Funktion, in dieser Arbeit über die Methode der kleinsten Quadrate, aus der geometrischen Distanz r zu den sichtbaren Satelliten, den Orten der Satelliten $(x_{s,ECEF,t}, y_{s,ECEF,t}, z_{s,ECEF,t})$ und den aufsummierten Korrekturwertabweichungen $\Delta \epsilon_{kor}$ berechnet. Zur Berechnung des Orts wird an dieser Stelle auf Abschnitt 3.1 verwiesen. Die allgemeine Abhängigkeit kann als

$$\begin{pmatrix} x_{bmO,ECEF,t} \\ y_{bmO,ECEF,t} \\ z_{bmO,ECEF,t} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} r_1 + \Delta\varepsilon_{korrr_1}, x_{1,s,ECEF}, y_{1,s,ECEF}, z_{1,s,ECEF} \\ \dots \\ r_n + \Delta\varepsilon_{korrr_n}, x_{n,s,ECEF}, y_{n,s,ECEF}, z_{n,s,ECEF} \end{pmatrix}, \quad (6-3)$$

formuliert werden. Die einzelnen Teile des Systemmodells werden nun im Folgenden beschrieben.

6.3.2 Bestimmung der geometrischen Distanz

Bevor der Einfluss der Messbedingungen bestimmt werden kann, werden als Grundlage die geometrischen Distanzen r zu den Satelliten bestimmt. Damit der Satellitenort aus den präzisen Orbitdaten (Index SP3) ermittelt werden kann, muss der Zeitpunkt der Signalausendung am Satelliten bestimmt werden. Dafür wird, ausgehend von einem Referenzort und -zeit, die Signallaufzeit zwischen Antennenzentrum am Prüfträger und Satellit geschätzt. Die Orte der Satelliten zur Emissionszeit können durch Interpolation aus den präzisen Orbitdaten bestimmt werden. Die präzisen Orbitdaten werden in 15-Minuten-Intervallen bereitgestellt. Um den genauen Zeitpunkt der Signalausendung zu treffen, bedarf es der Interpolation dieser Werte für jeden Iterationsschritt (siehe Unterkapitel 3.4). [vgl. Kouba 2009].

Als Initialisierungswert für die Laufzeitberechnung wird die mittlere Satellitensignallaufzeit von 0,067 s ausgewählt [vgl. Jakobsen et al. 2013]. Anschließend wird die daraus folgende geometrische Distanz durch Division mit der Lichtgeschwindigkeit in die Signallaufzeit transferiert und mit der letzten Satellitensignallaufzeit verglichen. Liegt eine Differenz größer als der Abbruchwert 10^{-8} s vor, wird der Startwert neu festgelegt und das Verfahren wiederholt, bis der Abbruchwert erreicht ist. Der Abbruchwert 10^{-8} s wurde gewählt, da für das Zeitintervall der Einfluss der Satellitenbewegung im Bereich von Mikrometern⁷ liegt und somit vernachlässigbar ist.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in den folgenden Abschnitten der Index der Empfängerantenne und die Indices für die Satelliten nicht mehr in den Gleichungen dargestellt. Sowohl die geometrischen Distanzen als auch die Korrekturwertabweichungen müssen für jeden sichtbaren Satelliten einzeln bestimmt werden.

6.3.3 Bestimmung der Korrekturwertabweichungen

Die generische Korrekturwertabweichung $\Delta\varepsilon$ wird exemplarisch aus einer den Einfluss bestimmenden Referenz δd_{REF} und aus dem für den Empfänger zur Verfügung stehenden Korrekturwert $\delta d_{schätz}$ bestimmt. Sie berechnet sich nach

$$\Delta\varepsilon = \delta d_{REF} - \delta d_{schätz}. \quad (6-4)$$

⁷ Die Satellitengeschwindigkeit liegt bei ca. 3,87 km/s. Multipliziert mit dem Abbruchwert 10^{-8} s ergibt sich eine Satellitenortsänderung von 0.0012 cm.

In der Gleichung ist die für den GNSS-Empfänger nicht bestimmbare Abweichung mit $\delta d_{schätz}$ benannt. Die Abweichungen können sowohl ausgehen von Abweichungen von Modelleingangsgrößen wie z. B. den Ephemeriden aus der Navigationsnachricht als auch von Abweichungen von Korrekturmodellen.

Nachdem die geometrischen Distanzen zu den Satelliten bestimmt wurden, werden im nächsten Schritt die für den GNSS-Empfänger aufsummierten Korrekturwertabweichungen $\Delta \delta_{korrr}$ gebildet. Dies geschieht auf Basis der allgemeinen Pseudodistanz-Gleichung. Werden dabei die Anteile der geometrischen Distanz vernachlässigt und die Empfängeruhr als genau angenommen ($c \cdot \delta t_u = 0$), reduziert sich die Gleichung 3-11 zu den aufsummierten Abweichungen für einen Satelliten durch die einzelnen Einflüsse ε auf:

$$\varepsilon = c \cdot \delta t_s + \delta d_{orb} + \delta d_{ion} + \delta d_{trop} + \delta_{mp}. \quad (6-5)$$

Dabei setzen sich die aufsummierten Abweichungen zusammen aus Distanzen aus der Satellitenuhrenabweichung $c \cdot \delta t_s$, der Orbitabweichungen δd_{orb} , der Abweichung durch ionosphärische Störungen δd_{ion} und durch troposphärischen Störungen δd_{trop} sowie aus den Abweichungen durch Mehrwegeeffekte δ_{mp} .

Die einzelnen Einflüsse aus Gleichung 6-5 werden durch den Empfänger in Echtzeit oder über Korrektursignale an den GNSS-Empfänger übertragen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Daten des SBAS-EGNOS, da diese typischerweise in den GNSS-Empfängern in Europa implementiert sind. Durch die Bereitstellung der Korrekturparameter über Satellitensignale können die Korrekturdaten durch den GNSS-Empfänger berechnet werden. Da die Korrektursignale jedoch streuen und in der Auflösung begrenzt sind, bleibt eine Abweichung zum wahren Wert erhalten. Dies ist das Ergebnis der Addition aus den real vorherrschenden Einflüssen, korrigiert um die Werte für den bmO. Somit ergeben sich die empfängerunabhängigen systematischen nicht korrigierten Einflüsse zu:

$$\Delta \varepsilon_{korrr} = c \cdot \Delta \delta t_s + \Delta \delta d_{orb} + \Delta \delta d_{ion} + \Delta \delta d_{trop} + \Delta_{mp} \quad (6-6)$$

Werden Satellitensignale eines einzelnen Satelliten komplett abgeschattet und ein Non-Line-Of-Sight-Empfang (NLOS) ist ausgeschlossen, wird der Satellit bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Ist ein NLOS-Empfang möglich, wird die Abweichung durch den verlängerten Signallaufweg in die Gleichung aufgenommen. Dies wurde in dieser Arbeit aufgrund der Komplexität nicht weiter betrachtet. Die Systematik der Berücksichtigung der Korrekturwertabweichung ist jedoch gleich der der anderen Einflüsse.

Im Folgenden werden Mehrwegeeffekte nicht weiter berücksichtigt, da Messfahrten nur in Messumgebungen durchgeführt wurden, in denen die Auftrittswahrscheinlichkeit von Mehrwegeeffekten sehr gering ist. Diese Annahme kann getroffen werden, da die Prüftrajektorie so gewählt wurde, dass keine Elemente in der Nähe vorhanden waren, die höher als die Antenne auf dem Fahrzeugdach waren.

Auf die einzelnen Korrekturwertabweichungen der verschiedenen Einflüsse wird im Folgenden eingegangen. Dabei werden die Korrekturwertabweichungen in der Reihenfolge entlang des Signallaufwegs vom Satelliten zum Empfänger dargestellt.

6.3.3.1 Bestimmung und Berücksichtigung der Uhrenabweichung

Der Empfänger berechnet die Uhrenabweichung in den Satelliten durch die Parameter Satellitenuhrenoffset, Satellitenuhrendrift und Satellitenuhrenbeschleunigung ($\alpha_{f0}, \alpha_{f1}, \alpha_{f2}$) aus der empfangenen Navigationsnachricht für den Zeitpunkt der Signalemittierung [vgl. DO-229-D]. Diese Daten streuen.

Eine genauere Angabe über die Satellitenuhrenabweichung steht in den präzisen Orbitdaten zur Verfügung. Die Uhrenabweichungen werden in Zeitintervallen von 5 s bereitgestellt und müssen auf die Nachrichtensendezeit interpoliert werden. Dafür wird auf das in Unterkapitel 3.4 dargestellte Interpolationsverfahren nach Lagrange zurückgegriffen. Die Korrekturwertabweichung der Satellitenuhren ergibt sich nach

$$\Delta t_{s,SP3} = \delta t_{s,SP3} - \delta t_{s,nav}. \quad (6-7)$$

mit $\delta t_{s,SP3}$ der Schätzung der Satellitenuhrenabweichung aus den präzisen Orbitdaten und $\delta t_{s,nav}$ der Uhrenabweichung, berechnet durch den Empfänger.

Stehen dem GNSS-Empfänger Korrekturdaten zur Verfügung, kann die Uhrenabweichung reduziert werden. Bei den Korrekturdaten des EGNOS werden in den „Slow-Corrections“ (MT 25) der Satellitenuhrenoffset ($\delta\alpha_{f0}$) und die Satellitenuhrendrift ($\delta\alpha_{f1}$) für jeweils 2 oder 4 Satelliten übertragen. Der Korrekturwert für die Satellitenuhr wird auf die geschätzte Uhrenabweichung aufsummiert [vgl. DO-229-D]. Folglich ergibt sich die Korrekturwertabweichung Δdt_s der Uhr für den Empfänger aus

$$\Delta dt_s = \delta t_{s,SP3} - (\delta t_{s,nav} + \delta t_{s,SBAS}). \quad (6-8)$$

6.3.3.2 Bestimmung und Berechnung der Orbitabweichungen

Der GNSS-Empfänger bestimmt den Ort der Satelliten anhand der Ephemeriden aus der Navigationsnachricht. Diese streuen. Die Abweichung kann anhand eines Vergleichs mit präzisen Orbitdaten ermittelt werden. Der für den GNSS-Empfänger nicht messbare relevante radiale Laufzeiteinfluss berechnet sich zu

$$\Delta d_{orb} = |\bar{x}_{SP3} - \bar{x}_{REF}| - |\bar{x}_{nav} - \bar{x}_{REF}|. \quad (6-9)$$

Dabei stellt \bar{x}_{SP3} den Ortsvektor der präzisen Orbitdaten des Satelliten und \bar{x}_{nav} den Ortsvektor aus der Navigationsnachricht dar. Stehen Korrekturdaten des EGNOS zur Verfügung, kann der Empfänger die möglichen Orbitabweichungen korrigieren. Die in MT 25 transferierten „Slow-corrections“ ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$) Korrekturwerte werden auf die Satellitenorte aufsummiert und die radiale Abweichung in Richtung des

GNSS-Empfängers bestimmt. Zusätzlich werden die „Fast-corrections“ Korrekturen auf der Distanzebene δ_ρ auf den radialen Abstand aufsummiert. Es folgt somit

$$\Delta d_{orb} = |\bar{\mathbf{x}}_{SP3} - \bar{\mathbf{x}}_{REF}| - |\bar{\mathbf{x}}_{Nav} - \bar{\mathbf{x}}_{REF} + [\delta_x, \delta_y, \delta_z]^T| + \delta_\rho. \quad (6-10)$$

6.3.3.3 Bestimmung und Berücksichtigung der ionosphärischen Laufwegverlängerung

Die für den GNSS-Empfänger nicht messbare Laufwegverzögerung in der Ionosphäre kann für die hier dargestellte GNSS-Empfänger-Konfiguration auf zwei verschiedene Arten korrigiert werden. Stehen Korrekturwerte des EGNOS zur Verfügung, wird auf diese zurückgegriffen. Ist dies nicht möglich, wird auf die Korrekturparameter aus der Navigationsnachricht nach „Klobuchar“ zurückgegriffen (siehe Unterkapitel 3.6). Die Korrekturwertabweichungen bestimmen sich aus dem geschätzten Einfluss durch den Referenzempfänger und dem geschätzten Einfluss auf Basis der Korrekturparameter aus der Navigationsnachricht. Der nicht-messbare Anteil durch die Ionosphäre Δd_{ion} berechnet sich nach

$$\Delta d_{ion} = I_{Ref} - I_{nav} \cdot m(v). \quad (6-11)$$

mit dem Referenzwert I_{Ref} und der Laufzeitverlängerung aus den Navigationsnachrichten I_{nav} . Aus den Daten der Navigationsnachricht wird die Laufzeit im Zenit bestimmt. Diese wird durch eine Mappingfunktion $m(v)$ in die Laufwegverlängerung der einzelnen Satelliten umgerechnet. Dabei wird der Referenzeinfluss anhand eines Mehrfrequenzempfängers bestimmt. Durch die Bereitstellung von Pseudodistanzen und Trägerphase auf dem L_1 und L_2 Band kann über die Linear-Kombination und anschließendes Filtern ein Referenzwert bestimmt werden (siehe Unterkapitel 3.6). Stehen Korrekturwerte des EGNOS zur Verfügung, kann die Laufwegverlängerung der Ionosphäre anhand der Korrekturwerte geschätzt werden. Diese Schätzung ist deutlich genauer als die Berechnung mit dem Modell nach Klobuchar, jedoch liegen auch hier Abweichungen vor. Folglich berechnen sich die Korrekturwertabweichungen nach

$$\Delta d_{ion} = I_{Ref} - I_{Sbas,Z} \cdot m(v). \quad (6-12)$$

6.3.3.4 Bestimmung und Berücksichtigung der Troposphäre

Ebenso wie bei der Bewertung der Korrekturwertabweichungen in der Ionosphäre berechnet sich der für den GNSS-Empfänger nicht messbare Anteil des Einflusses durch die Troposphäre aus einem Referenzwert und einem Schätzwert des Prüfgegenstands. Dieser schätzt den Einfluss der Troposphäre anhand von Standardatmosphärenwerten und dem geschätzten Ort des GNSS-Empfängers. Als Referenzwert wird in diesem Fall die Laufwegverlängerung durch die Troposphäre auf lokale Messdaten der Luftfeuchtigkeit, Partialdruck und Temperatur für einen Referenzort verwendet. Dieses Verfahren ist

als deutlich genauer zu bewerten als die Standardatmosphären-Schätzung. Die Korrekturwertabweichung durch die Troposphäre berechnet sich im Zenit nach

$$\Delta d_{tropo} = (T_{REF} - T_{nav}). \quad (6-13)$$

Die auf den lokalen Wetterdaten basierende vertikale Laufzeitverlängerung durch die Troposphäre kann durch Gleichungen 3-14 und 3-15 (siehe Unterkapitel 3.7) bestimmt werden. Steht der Satellit nicht im Zenit, wird die vertikale troposphärische Laufwegverlängerung durch den Mappingfaktor umgerechnet (siehe Abschnitt 3.7.1).

6.3.4 Berechnung des vorläufigen bestmöglichen Orts

Der vorläufige bmO berechnet sich aus der geometrischen Distanz und den aufsummierten Korrekturwerten und den präzisen Satellitenorten auf Basis der Gleichung (6-3). Dies geschieht nach dem im Abschnitt 3.1 dargestellten Verfahren.

Durch die Streuung der Referenzgrößenwerte muss der bmO um die Messunsicherheit erweitert werden. Diese wird im folgenden Abschnitt dargestellt. Treten bei der Messunsicherheitsanalyse systematische Abweichungen auf, muss der vorläufige bmO um diese korrigiert werden. Treten keine systematischen Abweichungen bei der Messunsicherheitsanalyse auf, ist der vorläufige bmO gleich dem finalen bmO. Der bmO wird ebenso wie die Messungen des Prüfgegenstands nach dem in Unterkapitel 5.4.1 und 5.4.2 dargestellten Vorgehen für die Auswertung quantifiziert. Als Ergebnis wird ein Ort bestimmt und die Messabweichung Δf des bmO wird berechnet.

6.4 Berechnung der Messunsicherheit des bestmöglichen Orts mittels Monte-Carlo-Simulation

Laut der DIN EN ISO/IEC 17025 besteht ein normkonformes Messergebnis aus dem Messwert bzw. Simulationswert und einer Angabe über die dazugehörige Messunsicherheit. Die Messunsicherheit wird durch einen Wertebereich basierend auf einer Wahrscheinlichkeit angegeben, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden kann [vgl. Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010]. Die Messunsicherheit wird maßgeblich durch die Anzahl und Größe der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen und deren Fortpflanzung durch das Messmodell beeinflusst. [vgl. Adunka 2007].

In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur normkonformen Bestimmung der Messunsicherheit vorhanden, angefangen mit der traditionellen Fehlerrechnung, dargestellt unter anderem von Adunka über das Standard-GUM-Verfahren nach [JCGM 100] bis zur Monte-Carlo-Simulation aus den Zusatzdokumenten des ISO/IEC Guide 98-3 [vgl. Adunka 2007; JCGM 100; ISO/IEC Guide 98-3].

In der Metrologie wird die Messunsicherheit häufig nach dem Standard-GUM-Verfahren bestimmt, obwohl sie unter Experten durch die Linearisierungen und Vernachlässigung der höheren Varianzterme

häufig kritisiert wird. Als Alternative wird im Supplement 1 des GUM das Monte-Carlo-Verfahren zur Evaluation des Standard-GUM-Verfahrens vorgeschlagen [vgl. Hennes M. 2007].

Das Monte-Carlo-Verfahren ist ein Brute-Force-Ansatz zur Lösung komplexer Probleme. Es beruht auf dem Gesetz der großen Zahlen, das besagt, dass die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses sich um die theoretische Wahrscheinlichkeit eines Zufallsergebnisses stabilisiert. Dabei können die Zufallsergebnisse sowohl durch real durchgeführte Versuche erzeugt als auch simuliert werden. Beim simulativen Monte-Carlo-Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit werden die Eingangsgrößen entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zufällig erzeugt und mittels eines Messmodells die dazugehörigen Ausgangsgrößen berechnet⁸. Liegt eine ausreichende Anzahl von Ausgangsgrößen vor, lassen sich diese durch geeignete statistische Maße beschreiben. [vgl. ISO/IEC Guide 98-3].

Im Gegensatz zum Standard-GUM-Verfahren ist die Monte-Carlo-Simulation kein exaktes Verfahren. Dennoch ermöglicht die Monte-Carlo-Simulationsmethode die Angabe der Messunsicherheit der Ausgangsgröße in Form einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die nach dem Standard-GUM-Verfahren nicht explizit ermittelt wird [vgl. Cox/Siebert 2006].

Aus den simulierten Werten lässt sich die Verteilungsdichtefunktion schätzen. Mit steigender Anzahl von Wiederholungen wird diese jedoch immer stabiler. Diesem Vorteil steht ein erhöhter Rechenaufwand entgegen. Insbesondere bei komplexen Modellen ist es nicht möglich, die erforderliche Anzahl von Simulationen durchzuführen [vgl. Wegener/Schnieder 2013].

Das systematische Vorgehen bei der Bestimmung der Messunsicherheit durch eine Monte-Carlo-Simulation ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

⁸ Das Erzeugen von Zufallszahlen wird viel erforscht. Für die weitere Arbeit wird angenommen, dass das Programm MATLAB diese korrekt ermittelt.

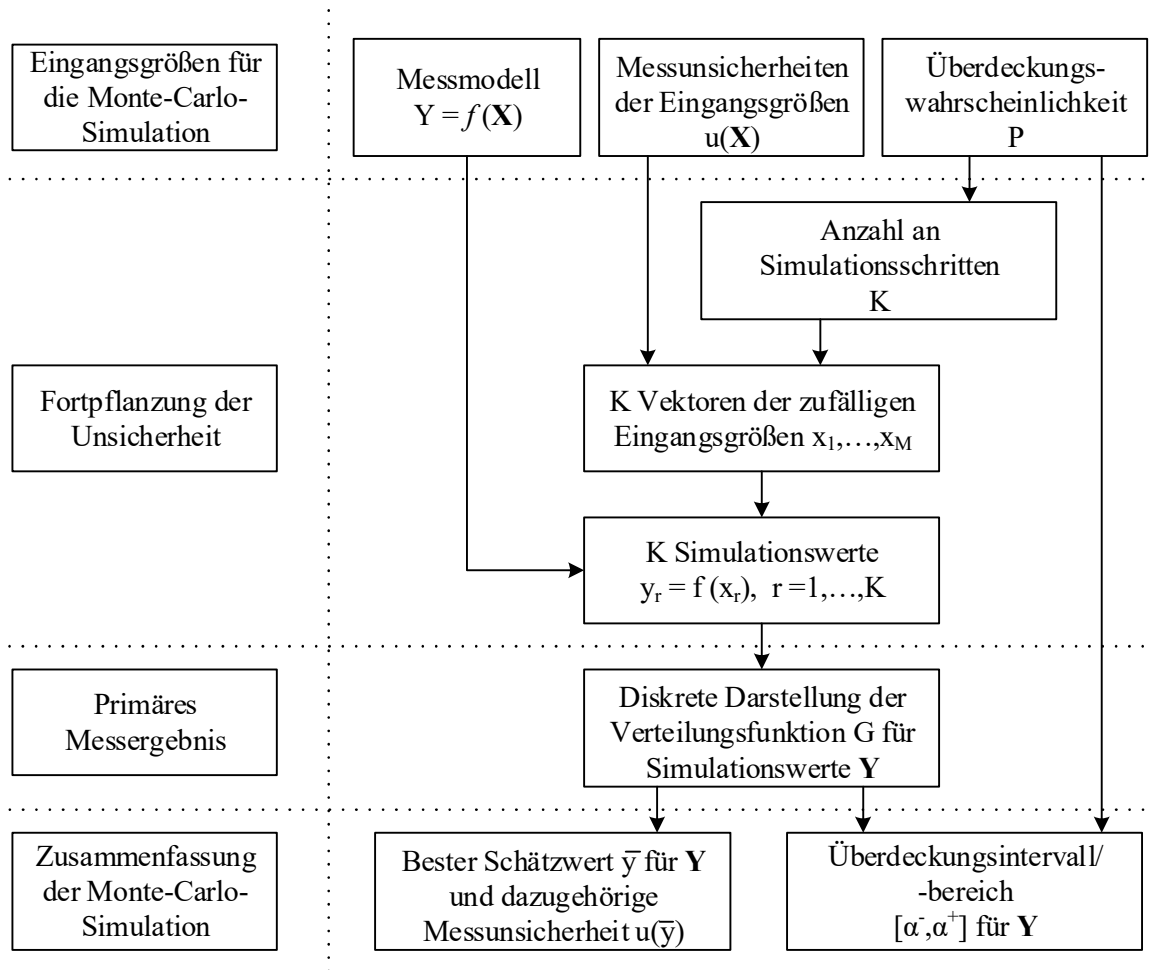


Abbildung 6-4: Darstellung des Monte-Carlo-Verfahrens ab Bestimmung der Anzahl der Messwerte [vgl. ISO/IEC Guide 98-3]

6.4.1.1 Modellierung der Messung

Die Monte-Carlo-Simulation erfordert, wie die Berechnung des bmO, ein Messmodell, anhand dessen die Fortpflanzung der Messunsicherheit der Eingangsgrößen untersucht werden kann. Analog zu Unterkapitel 6.3 werden die Simulationsgrößen $y_m (m = 1, \dots, M)$ durch die Messfunktion $f(\mathbf{X})$ und die Eingangsgrößen $x_r (r = 1, \dots, R)$ bestimmt.

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = f(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_R) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_R) \\ f_3(x_1, x_2, \dots, x_R) \end{pmatrix} \quad (6-14)$$

6.4.1.2 Bewertung der Eingangsgrößen

Den unkorrelierten Eingangsgrößen werden individuelle Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zugeordnet. Dabei wird in statistische (Typ-A) und stochastische (Typ-B) Eingangsgrößen unterschieden.

Typ-A Eingangsgrößen basieren auf empirisch ermittelten Häufigkeitsdichtefunktionen, die durch verschiedene Verteilungen angegeben werden. Werden die Daten als standardverteilt angenommen, ermittelt sich die Messunsicherheit $u_{\bar{x}}$ aus der Standardabweichung s der Eingangsgröße x und der Anzahl der Messwerte K :

$$u_{\bar{x}} = \frac{s(x(1), \dots, x(K))}{\sqrt{K}}. \quad (6-15)$$

Typ-B Eingangsgrößen basieren auf einer a priori-Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die aus Datenblättern, Herstellerangaben oder Kalibrierdaten hervorgeht oder von Experten auf Basis langjähriger Erfahrung geschätzt wird. Dabei sind verschiedenste Verteilungsfunktionen (z. B. Normalverteilung, Gleichverteilung, Dreiecksverteilung) möglich.

Prinzipiell werden beide Typen der Eingangsgrößenschätzung als gleichwertig angenommen. Da für die folgende Arbeit Typ-B Größen nicht benötigt werden, wird an dieser Stelle auf den Standard JCGM 100 zur detaillierten Erklärung verwiesen [vgl. JCGM 100].

Hängt die Messunsicherheit einer Eingangsgröße von der Messunsicherheit einer anderen Eingangsgröße ab, sind die Messunsicherheiten korreliert. Daneben gibt es Einflüsse, die sich auf mehrere Eingangsgrößen auswirken, beispielsweise die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Ist die Korrelation klein im Vergleich zu den Messunsicherheitsbeiträgen, darf sie vernachlässigt werden. Dabei ist zu beachten, dass, wenn Eingangsgrößen als Summe oder Differenz auftreten, sie zu einem stärkeren Anstieg der Messunsicherheit als bei der unkorrelierten Betrachtung führen. Treten die Eingangsgrößen als Division oder Subtraktion in der Messfunktion auf, verringert sich die Messunsicherheit [vgl. Sommer/Siebert 2006].

Die Korrelation der Einflüsse der einzelnen Satelliten in der Troposphäre oder Ionosphäre wird jeweils als nicht vorhanden oder als vernachlässigbar angenommen, da sich für den Fall der korrelierten Eingangsgrößen die Effekte in einer größeren Empfängeruhrenabweichung ausdrücken würden [vgl. Schön/Kutterer 2006; Fuhlbrügge 2004; DO-229-D]. Diese Annahme wird in dieser Arbeit übernommen.

6.4.1.3 Berechnung des besten Schätzwerts und der kombinierten Standardmessunsicherheit

Die Messunsicherheit der Simulationsgrößen wird während einer Monte-Carlo-Simulation numerisch ermittelt. Dies erfordert die Definition der Anzahl der notwendigen Simulationen. Dabei gilt, dass eine große Anzahl von Simulationen das Vertrauen in das Resultat erhöht, jedoch auch eine größere Rechenleistung erfordert. Die Anzahl der Simulationsschritte K wird in der Norm von

$$K \geq 10^4 \cdot \frac{1}{1-P} \quad (6-16)$$

der Überdeckungswahrscheinlichkeit P abgeleitet [vgl. ISO/IEC Guide 98-3]. Dabei basiert Gleichung 6-16 auf der Erfahrung diverser Untersuchungen und ist eher als Anhaltswert zu betrachten. Insbesondere für korrelierte Systeme und sehr komplexe Modelle muss K gegebenenfalls nach oben korrigiert werden. Dafür wurden spezielle Algorithmen entwickelt, die adaptiv auf der Basis verschiedener Parameter die Anzahl weiterer Simulationen schätzen, bis das geforderte Vertrauen erzielt ist [vgl. ISO/IEC Guide 98-3].

Nach der Wahl der Anzahl der Simulationen müssen die Zufallswerte der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der einzelnen Eingangsgrößen generiert werden. Die Generation von Zufallszahlen ist eine Basisfunktion in gängigen Rechenprogrammen. Zufallszahlen, die der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Standardverteilungen folgen, können mittlerweile sehr genau simuliert werden.

Basierend auf den Zufallswerten der Eingangsgrößen, dem Messmodell und der Anzahl der Simulationen können die K Ausgangswerte $y(1), \dots, y(K)$ berechnet werden. Der beste Schätzwert \bar{y} für eine skalare Ausgangsgröße kann anschließend durch

$$\bar{y} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y(k) \quad (6-17)$$

bestimmt und mit der Standardmessunsicherheit für eine skalare Größe $u_{\bar{y}}$

$$u_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (y(k) - \bar{y})^2} \quad (6-18)$$

versehen werden. In vektorieller Form, falls mehrere Ausgangsgrößen vorliegen, werden die besten Schätzwerte durch den Vektor $\bar{\mathbf{y}}$ dargestellt. Die besten Schätzwerte berechnen sich aus

$$\bar{\mathbf{y}} = \frac{1}{K} (\mathbf{y}(1) + \dots + \mathbf{y}(K)) \in \mathbb{R}^{(M,1)}. \quad (6-19)$$

Die korrespondierende Messunsicherheitsmatrix lässt sich durch

$$\mathbf{U}_{\bar{\mathbf{y}}} = \frac{1}{K-1} ((\mathbf{y}(1) - \bar{\mathbf{y}})(\mathbf{y}(1) - \bar{\mathbf{y}})^T + \dots + (\mathbf{y}(K) - \bar{\mathbf{y}})(\mathbf{y}(K) - \bar{\mathbf{y}})^T) \quad (6-20)$$

berechnen [vgl. ISO/IEC Guide 98-3]. Damit stehen am Ende der Simulation jeder Ausgangsgröße ein bester Schätzwert und die dazugehörige Messunsicherheit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit bereit.

6.4.1.4 Berechnung des Überdeckungsintervalls vektorieller Größen

In der Metrologie und industriellen Anwendungen ist neben dem besten Schätzwert die Überdeckungswahrscheinlichkeit für einen bestimmten Wert, z. B. $P = 95\%$, von Bedeutung. Für eine Ausgangsgröße kann diese bestimmt werden, sobald die Häufigkeitsverteilung der Messunsicherheit bekannt ist. Ist mehr als eine Ausgangsgröße von Interesse, wird ein Überdeckungsbereich mit m -Dimensionen bestimmt [vgl. Cox/Siebert 2006].

Liefert das Messmodell nur eine Ausgangsgröße, lässt sich das Überdeckungsintervall anhand weniger Schritte ermitteln. Dafür werden die Messwerte nach dem Größenwert nicht-abfallend $(y_1^\circ, \dots, y_k^\circ)$ sortiert und die diskrete Verteilungsdichtefunktion G_Y durch

$$G_Y(y(k)) := \int_{y_1^\circ}^{y_k^\circ} g_Y(\tau) d\tau, y^\circ(1) \leq y^\circ(k) \leq y^\circ(K) \quad (6-21)$$

gebildet. Das Überdeckungsintervall kann anschließend für das obere und untere Quantil über

$$\alpha^- = G_Y^{-1}\left(\frac{1-P}{2}\right) \text{ und } \alpha^+ = G_Y^{-1}\left(\frac{1+P}{2}\right) \quad (6-22)$$

ermittelt werden.

Liegt ein Modell mit mehreren Ausgangsgrößen vor, muss die mögliche Korrelation bei der Ermittlung des Überdeckungsbereichs berücksichtigt werden. Bei einer großen Anzahl von Simulationen in Verbindung mit der Annahme, dass die Ausgangsgrößen normal verteilt sind, wird die kleinstmögliche Fläche durch ein Hyperellipsoid beschrieben [vgl. JCGM 102]. Das Hyperellipsoid lässt sich durch:

$$(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{y}}}^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) = k_p^2 \quad (6-23)$$

beschreiben. Dabei besitzt der Mittelpunkt des Hyperellipsoids die besten Schätzwerte $\bar{\mathbf{y}}$. Die Form und Ausbreitung wird durch die Unsicherheitsmatrix $\mathbf{U}_{\bar{\mathbf{y}}}$ definiert und der umschlossene Raum durch die Wahl von k_p festgelegt. Durch den Zusammenhang von k_p und der Überdeckungswahrscheinlichkeit P kann P so gewählt werden, dass k_p eine Überdeckungswahrscheinlichkeit festlegt. Wenn \mathbf{y} der Form einer bivarianten Normalverteilung folgt, ist die Größe

$$(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^T \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{y}}}^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}) \quad (6-24)$$

charakterisiert durch eine Chi-Quadrat-Verteilung mit m -Freiheitsgraden. Aus dieser lässt sich der Wert für k_p^2 für eine spezifizierte Wahrscheinlichkeit bestimmen. Die Bedingung

$$p = \Pr(\chi_2^2 \leq k_p^2) \quad (6-25)$$

wird erfüllt. So ergibt sich beispielsweise für eine geforderte Überdeckungswahrscheinlichkeit $p = 0,95$ (95 %), ein $k_p = 2,45$ [vgl. JCGM 102].

6.5 Darstellung des vollständigen Messergebnisses

Die vollständige Darstellung des Messergebnisses besteht aus dem zu qualifizierenden Merkmal bzw. den Merkmalen und dem Merkmal zur Beschreibung der Messbedingungen und den dazugehörigen Messunsicherheiten. Für die folgende Darstellung wird von einem mehrdimensionalen Qualitätsmerkmal ausgegangen.

Messgröße

Für das Qualitätsmerkmal mit einer parameterabhängigen Verteilung wird das Messergebnis in der Form von

$$Y = \bar{y} \pm U_{\bar{y}} \quad (6-26)$$

angegeben. Darüber hinaus bedarf es der Angabe des für die Überdeckungswahrscheinlichkeit P ermittelten Faktors k_P . Dementsprechend liegt der Messwert im Bereich von:

$$\bar{y} - U_{\bar{y}} \leq Y \leq \bar{y} + U_{\bar{y}} \text{ für } (P = \text{Wert}). \quad (6-27)$$

Folgen die Messwerte keiner parameterabhängigen Verteilung, was durch eine geringe Stichprobenanzahl hervorgerufen werden kann, muss auf parameterunabhängige Verteilungen zurückgegriffen werden. Dabei liefert die Darstellung durch relative Summenhäufigkeitsfunktionen, kombiniert mit der Angabe des Median und Perzentilen, ein aussagekräftiges Messergebnis.

Zusätzlich muss zu den Größenwerten eine Angabe über die Genauigkeit der Referenz mit der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit dokumentiert sein.

Merkmal zur Beschreibung der Messbedingungen

Neben dem eigentlichen Qualitätsmerkmal ist das in diesem Kapitel eingeführte Merkmal des bmO Bestandteil des Messergebnisses. Dazu wird die Angabe über die Messbedingungen

$$F = \bar{\Delta f} \pm U_{\bar{\Delta f}}. \quad (6-28)$$

eingeführt. Dementsprechend liegt der wahre Wert der Messbedingungen mit der geforderten Wahrscheinlichkeit im Bereich von:

$$\bar{\Delta f} - U_{\bar{\Delta f}} \leq F \leq \bar{\Delta f} + U_{\bar{\Delta f}}. \quad (6-29)$$

Verwirft der Hypothesentest die Annahme von Messwertverteilungen, müssen die Messergebnisse durch eine parameterunabhängige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angegeben werden. Dabei wird in dieser Arbeit auf die relative Summenhäufigkeitsfunktion zurückgegriffen. Die nach der Größe sortierten Messergebnisse werden dabei von einem oberen und unteren Toleranzband der Messunsicherheit eingeschlossen.

6.6 Erkenntnisse aus der Betrachtung der bestmöglichen Orte

Das Messergebnis setzt sich folglich aus den Qualitätsmerkmalszahlen für den Prüfgegenstand, den Messbedingungen und der Referenzgenauigkeit zusammen. Durch die Einführung des bmO werden die Anforderungen hinsichtlich der Dokumentation der Messbedingungen erfüllt. Darüber hinaus ermöglicht die Einführung des bmO den Vergleich von Messungen und die Verifikation von spezifizierten Anforderungen.

6.6.1 Vergleich von Messungen

Ist der Größenwert der bmO-Abweichung einer Messfahrt 1 ähnlich dem einer Messfahrt 2, können die Prüfergebnisse der Qualitätsmerkmale direkt miteinander verglichen werden. Da dies sehr unwahrscheinlich ist, muss ein Bereich bestimmt werden, in dem Messfahrten als vergleichbar gelten.

In EN 16803-1 dürfen Messfahrten miteinander verglichen werden, wenn die mittleren Abweichungen (in der Norm, gemessen mit einem Referenzempfänger) der Messwerte nicht mehr als 10% voneinander entfernt liegen. Die Streuung der Messwerte aus der Beschreibung der Messumgebung wird dort nicht weiter betrachtet, obwohl sie doch einen erheblichen Einfluss auf die Messqualität hat. Aus diesem Grund wird dieses Vorgehen verworfen. [vgl. DIN EN 16803-1].

Werden Messfahrten unter verschiedenen Messbedingungen durchgeführt, muss das Messergebnis von der einen Prüffahrt auf die Vergleichsfahrt umgerechnet werden. Hierfür bieten sich zwei Möglichkeiten an.

1. Stehen sehr viele lange Datenreihen mit vielen verschiedenen Messbedingungen zur Verfügung, kann mit einem geeigneten Suchalgorithmus ein Segment, das über eine ausreichende Prüfgrößenanzahl verfügt, gefunden werden, das eine gleiche bmO-Abweichung und eine ähnliche bmO-Präzision besitzt wie die Vergleichsfahrt.
2. Besteht diese Möglichkeit nicht, muss versucht werden, einen Zusammenhang zwischen der Prüfgröße und dem bestmöglichen Ort zu erzeugen. Dafür werden die einzelnen Prüfwerte der Messfahrt mit der größten Anzahl von Messwerten über die bmO-Abweichung aufgetragen und eine Ausgleichsfunktion mathematisch beschrieben. Das vorliegende Messergebnis kann anschließend anhand der Ausgleichsfunktion auf den Indikatorwert der Vergleichsfahrt übertragen werden.

Steht keine ausreichende Anzahl von Prüfwerten zur Verfügung, ermöglicht der bmO lediglich eine quantitative Aussage über die während der Messung vorliegenden Messbedingungen.

6.6.2 Aussagekraft des bestmöglichen Orts im Kontext der Verifizierung der Anforderungen einer Anwendung

Anhand von Messfahrten oder Simulationen kann untersucht werden, ob der Prüfgegenstand die spezifizierten Anforderungen erfüllt und ob ein Zusammenhang zwischen der Messqualität des Prüfgegenstands, der Kategorie des Prüfgegenstands und den bmO-Abweichungen besteht.

Die spezifizierten Anforderungen werden dabei aus dem Gesamtsystem abgeleitet und sind abhängig von der Genauigkeit weiterer Sensoren und den gewählten Fusionsalgorithmen. Sind die spezifizierten Anforderungen an den GNSS-Empfänger bekannt, können sie in Relation zu den auftretenden Messbedingungen geprüft werden. Dafür werden für die intendierte Anwendung in den Betriebsbedingungen anhand von Simulationswerkzeugen die möglichen auftretenden Messbedingungen identifiziert, die daraus resultierenden bestmöglichen Orte bestimmt und in Form von Verteilungen dargestellt. Durch Variation der Messbedingungen in den bekannten Größenordnungen und der Gefahren aus den Gefährdungsmodellen kann eine Verteilung der auftretenden Messbedingungen hinsichtlich der Anforderungen für ein bestimmtes Betriebsszenario erstellt werden. Dieses ist exemplarisch in Abbildung 6-5 oben dargestellt.

Werden Prüffahrten durchgeführt und dafür die bmO-Abweichungen bestimmt, können diese in Form von absoluten oder relativen Häufigkeiten dargestellt werden (siehe zweite Grafik in der Abbildung 6-5). Der Zusammenhang zwischen den Anforderungen und den Messbedingungen während der Prüffahrt lässt sich anhand des Median und eines Parameters zur Beschreibung der Streuung der Messwerte darstellen. Die orangenen Linien stellen in der Abbildung das 5. und 95. Perzentil der umhüllten Messwerte für die Anforderungen und die Messbedingungen während der Messung dar. Auf eine Darstellung des Median wurde aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.

Wurden Messfahrten durchgeführt und die Messgenauigkeit ermittelt (in Abbildung 6-5 das 5. und 95. Perzentil) und mit den vorherrschenden bmO-Abweichungen in Relation gesetzt, können die spezifizierten Anforderungen mit der Ortungsqualität des Prüfgegenstands verglichen und eine Konformitätsentscheidung gefällt werden.

Dabei können drei verschiedene Fälle auftreten. In der Abbildung sind zwei Fälle (Fall 1 und Fall 3) dargestellt.

1. Der Prüfgegenstand weist geringere mittlere Ortsabweichungen und Grenzen für das 5. und 95. Perzentil als in der Simulation auf. Dies ist möglich, wenn die in dem Prüfgegenstand implementierten Algorithmen besser als die nach dem Stand der Technik bekannten und implementierten sind. Für diesen Fall kann nach dem Prüfen bei einfachen Messbedingungen und schwierigen Messbedingungen die Konformität verifiziert werden.
2. Der Prüfgegenstand verhält sich identisch zu den Algorithmen des bestmöglichen Orts, erfüllt die simulierte Häufigkeitsverteilung und die Anforderungen an das Szenario. Dann werden die

Anforderungen durch den Prüfgegenstand auch erfüllt. Dieses Verhalten ist eher unwahrscheinlich, da das Messrauschen die Streuung der Ortsgenauigkeit beeinflusst und die Algorithmen möglicherweise fortschrittlicher sind.

3. Im Gegensatz zu Fall 1 weist der Prüfgegenstand bedingt durch Rauschen und sonstige Einflüsse eine schlechtere Messqualität auf. Dies kann anhand der verbreiterten Messwertverteilungen und des Versatzes des Median erkannt werden. Für diesen Fall kann die Konformität des Prüfgegenstands mit den Anforderungen nicht gewährleistet werden.

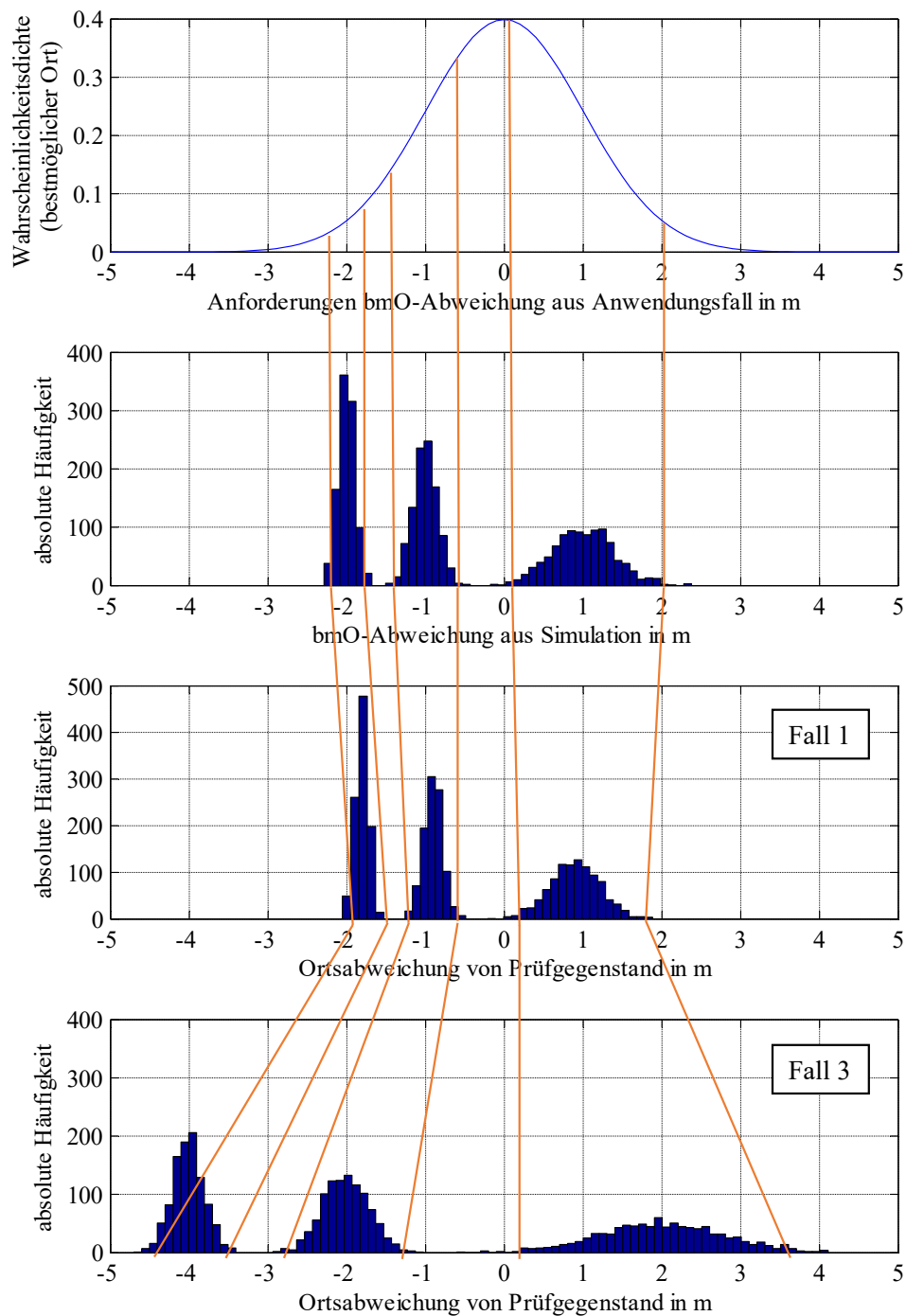


Abbildung 6-5: Bestmöglicher Ort im Kontext von Gefährdungsmodellen

In Abhängigkeit von den Anforderungen an den Prüfgegenstand und die Qualitätsmerkmale hilft diese Betrachtung zu prüfen, ob der Prüfgegenstand in der Lage ist, die Ortsgenauigkeit zu liefern, die für die spezifizierte Anwendung erforderlich ist.

Bedingt durch die verschiedenen Einflüsse und die Grenzen der Simulations- und Messfähigkeit können nicht alle Einflüsse realgetreu nachgebildet werden. Daher ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich, einen bmO für sehr komplexe Prüffälle (z. B. Durchfahrt eines nassen Blätterdachs) zu simulieren. Diese Prüffälle müssen getrennt identifiziert und getestet werden.

7 Entwurf und Realisierung einer Toolbox zur Berechnung des bestmöglichen Orts

Für die Berechnung des bmO für zeitgemäße Automotive-GNSS-Empfänger wurde ein Werkzeug namens CONCAL (Condition Calculation) programmiert. Das Werkzeug arbeitet auf der Basis des Rechenprogramms MathWorks MATLAB. In diesem Kapitel wird auf die Anforderungen an das Werkzeug, die Eingangsgrößen, die Funktionsweise und Verifizierung eingegangen.

7.1 Anforderungen an CONCAL

Das Hauptziel des Werkzeuges ist die Bestimmung des bmO und der dazugehörigen Messunsicherheit und Qualitätsmerkmale. Die Anforderungen an CONCAL wurden in Kategorien in Bezug auf die Technologie des Prüfgegenstands, die Ortungslösung, systemische Anforderungen und die Auswertung strukturiert.

Die technologischen Anforderungen beinhalten, dass das Programm nach dem Messprinzip der gängigen C/A-Code-Empfänger arbeitet, die Variation des Maskierungswinkels ermöglicht, die einzelnen Korrekturmodelle ein- bzw. abschaltet und, falls gewünscht, verschiedene Korrekturdaten von SBAS-Systemen berücksichtigt werden können.

Die Funktionsweise des Empfängers wurde in CONCAL auf die Code-Lösung beschränkt. Diese basiert auf dem zu qualifizierenden Prüfgegenstand, der ebenso nach dem Prinzip der Code-Lösung arbeitet. Eine Erweiterung auf weitere GNSS-Systeme oder Möglichkeiten der Bestimmung der systematischen Einflüsse ist durch den modularen Aufbau der Software möglich.

Auf der Ebene der Systemanforderungen ist es das Ziel, das Qualifizieren von weiteren Prüfungen in weiteren Regionen und Prüfgegenständen zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde bei den Daten zur Bestimmung der Einflüsse und Referenzwerte auf die gängigen Datenaustauschformate zurückgegriffen.

Auf Ebene der Auswertung soll die Darstellung der Ortsabweichung in verschiedenen Koordinatensystemen sowohl über die Zeit als auch über die zurückgelegte Wegstrecke des Prüffalls oder -szenarios möglich sein. Darüber hinaus soll der Einfluss der Ortungslatenz auf die Ortsgenauigkeit darstellbar sein. Auf der Ebene der anderen Hauptqualitätsmaße sollen die Verfügbarkeit, Überlebensfähigkeit und Integrität in der Form von Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeitsverteilungen in Abhängigkeit von den spezifizierten Anforderungen dargestellt werden können.

7.2 Eingangsgrößen in CONCAL

Damit das Werkzeug die Berechnung durchführen kann, bedarf es als Basis für die gesamte Bestimmung des bmO und der Qualitätsmerkmale eines Datensatzes mit Referenzorten inklusive des dazugehörigen

Gültigkeitszeitpunkts. Diese werden in Form eines Vektors an das Werkzeug weitergereicht. Da bei den Referenzmesssystemen noch keine standardisierte Ausgabe bekannt ist, wurde ein eigenes Format ausgewählt.

Im Gegensatz dazu stehen für die Bestimmung der einzelnen Einflüsse und Korrekturdaten diverse Produkte in definierten Formaten zur Verfügung. Die in dem Werkzeug implementierten Daten von Drittanbietern, deren zeitliche Auflösung sowie der Grund der Nutzung sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Für die GPS/GLONASS Navigation Files wurde nicht auf einen zentralen Dienst zurückgegriffen, da die dort bereitgestellten Daten nicht geprüft und oft fehlerhaft sind. Heng hat die weltweit bereitgestellten Navigation-Files hinsichtlich ihrer Genauigkeit bewertet. Dabei wurden in 4 Jahren (zwischen 2000 und 2004) 1256 Anomalien festgestellt [vgl. Liang Heng 2012].

In dieser Arbeit wurde auf geprüfte Daten des Stanford GPS-Laboratory zurückgegriffen, die für alle Satelliten stets die neusten Navigationsnachrichten bereitstellen. Dies hat den Vorteil, dass stets mit den neusten Navigationsnachrichten gerechnet werden kann. Bei Nutzung der Daten einer lokalen Referenzstation könnte der Zustand eintreten, dass die Navigationsnachrichten eines Satelliten für die Referenzstation schon empfangbar sind, für den Prüfgegenstand jedoch noch nicht. Ebenso ist der umgekehrte Fall möglich.

Tabelle 7-1: Auflistung der genutzten externen Daten

Produkt	Zeitliche Auflösung	Bestimmung der Abweichung
IGS-Orbit [International GNSS Service 2015]	15 min	Orbit
IGS-Clock [International GNSS Service 2015]	30 s	Satellitenuhr
GPS Navigation file [Stanford University GPS Laboratory 2017]	120 min	Orbit
EMS-file [European Space Agency 2016a]	6 s, 300 s, 6 s	EGNOS Korrekturdaten
RINEX-Observation File [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017]	30 s	Ionosphäre
Meteo-File [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017]	15 min	Troposphäre

7.3 Funktionsweise von CONCAL

Am Anfang der Berechnung wird die geometrische Distanz zwischen Antennenzentrum des Satelliten und der Antenne am Fahrzeug bestimmt. Dies geschieht auf der Basis der Referenzdaten. Dafür wird

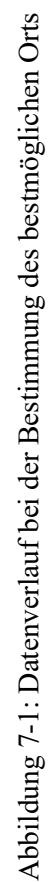
die Emissionszeit der Satellitensignale benötigt. Durch den geringen Detaillierungsgrad der Ausgabedaten eines Automotive-GNSS-Empfängers kann der genaue Zeitpunkt der Signalemission am Satelliten nicht bestimmt werden, da die benötigten Informationen, wie z. B. die Anzahl der gesendeten Bits in dem Navigation Nachricht Subframe und die Anzahl der C/A-Code Perioden, nicht vom GNSS-Empfänger bereitgestellt werden [vgl. Misra/Enge 2011]. Ausgehend vom Referenzzeitpunkt und dem Referenzort werden nach der Korrektur um den Uhrenversatz und UTC-Zeit anhand des vollständigen Sets der Navigationsdaten die Orte für alle Satelliten bestimmt, bis die Änderung der Laufzeit zwischen den einzelnen Iterationsschritten 10^{-10} s erreicht hat.

Im Anschluss an die Berechnung werden als Basis für die Bestimmung der SBAS Korrekturdaten und der Troposphärenlaufzeitverlängerung die Elevations- und Azimutwinkel der Satelliten bestimmt. Alle Satelliten mit einem Elevationswinkel, dessen Maskierungswinkel kleiner als der definierte Wert ist, werden für die weitere Bearbeitung für diesen Referenzort ausgeschlossen.

In dem nächsten Schritt werden die Größenwerte der einzelnen Einflüsse bestimmt. Dafür wird auf die in Kapitel 3 dargestellten Verfahren und Verweise zurückgegriffen. Sind die Größenwerte der Einflussgrößen bestimmt, werden diese auf die geometrischen Distanzen aufsummiert (siehe Unterkapitel 6.3.3). Die Bestimmung der bestmöglichen Orte wird anschließend auf Basis des in Unterkapitel 3.1 dargestellten Verfahrens durchgeführt.

Im Anschluss an die eigentliche Bestimmung des bmO wird die Messunsicherheitsanalyse in Abhängigkeit von den Messunsicherheiten der einzelnen Einflüsse und der Elevationswinkel durchgeführt. Mehrere Messungen haben dabei gezeigt, dass eine Million Simulationsschritte zufriedenstellende Ergebnisse bereitstellen. Zu jedem Referenzmesswert werden anschließend die systematischen Abweichungen, die maximalen und minimalen Abweichungen sowie die Richtungswinkel der Messunsicherheitsellipse bestimmt und die bmOs um die systematischen Abweichungen durch die Messunsicherheit korrigiert.

Zum Ende der Berechnung werden in CONCAL die bmOs in verschiedenen Größen zusammengefasst und grafisch dargestellt. Eine systematische Übersicht der Einflussgrößen und deren Zusammenhänge sind in Abbildung 7-1 dargestellt.



7.4 Verifizierung von CONCAL

Um das CONCAL zu verifizieren, wurde die korrekte Implementierung der Algorithmen während der Entwicklung auf mehreren Ebenen durchgeführt. Die Verifizierung wurde anhand von logischen Berechnungen, Vergleich von Messwerten und simulierten Werten und durch den Vergleich der Größenordnung der nicht korrigierten systematischen Abweichungen mit denen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen durchgeführt. Die Verifikation des Ortslösealgorithmus wurde anhand der geometrischen Range durchgeführt. Bei Simulationen ohne Abweichungen betrug die Differenz zwischen berechnetem Ort und Referenzort nach Bestimmung der präzisen Satellitenorte und Lösen der Ortsgleichungen lediglich 10^{-7} m.

7.4.1 Verifikation über die Anzahl der sichtbaren Satelliten, Azimut und Elevation

Auf der ersten Ebene nach Erstellung der Auswertung der Navigationsdaten wurde die Anzahl der sichtbaren Satelliten mit denen des GNSS-Empfängers verglichen. Die Empfänger stellen die Elevations- und Azimutwinkel in ganzzahligen Graden bereit. Diese Gradsprünge konnten analog zu den gleichen Zeitpunkten in den berechneten Daten aus den Navigationsnachrichten und den präzisen Orbitdaten ermittelt werden.

7.4.2 Verifikation der Korrekturdaten

Die Verifizierung der korrekten Implementierung der SBAS-Korrekturdaten wurde anhand eines Lehrprogramms der ESA durchgeführt. Der sogenannte SBAS-Teacher ermöglicht die Darstellung einzelner Korrekturwerte für verschiedene SBAS-Nachrichten [vgl. European Space Agency 2016b]. Lediglich die Berechnung der ionosphärischen Laufzeitverlängerung wird für den Referenzort nicht bereitgestellt. Es wird angenommen, dass die Umsetzung der Berechnungsvorschrift aus der RTCA DO-229 korrekt umgesetzt wurde [vgl. DO-229-D].

7.4.3 Verifikation der Orbitabweichungen

Die korrekte Implementierung der Bestimmung der präzisen Orbitdaten wurde durch den Vergleich mit wissenschaftlichen Ergebnissen verifiziert. In Abbildung 7-2 sind die Orbitabweichungen für verschiedene Satelliten für einen Zeitraum von ca. 1,5 Stunden dargestellt. Die berechneten Orbitabweichungen weisen Größenwerte im Bereich der von Montenbruck et al., Opitz et al. und Warren und Raquet ermittelten Abweichungen auf [vgl. Opitz et al. 2007; Montenbruck et al. 2015; Warren/Raquet 2003]. Die Sprünge in den Abweichungen von mehreren Dezimetern bei Epoche 12500 sind auf den Wechsel der Navigationsdaten zurückzuführen.

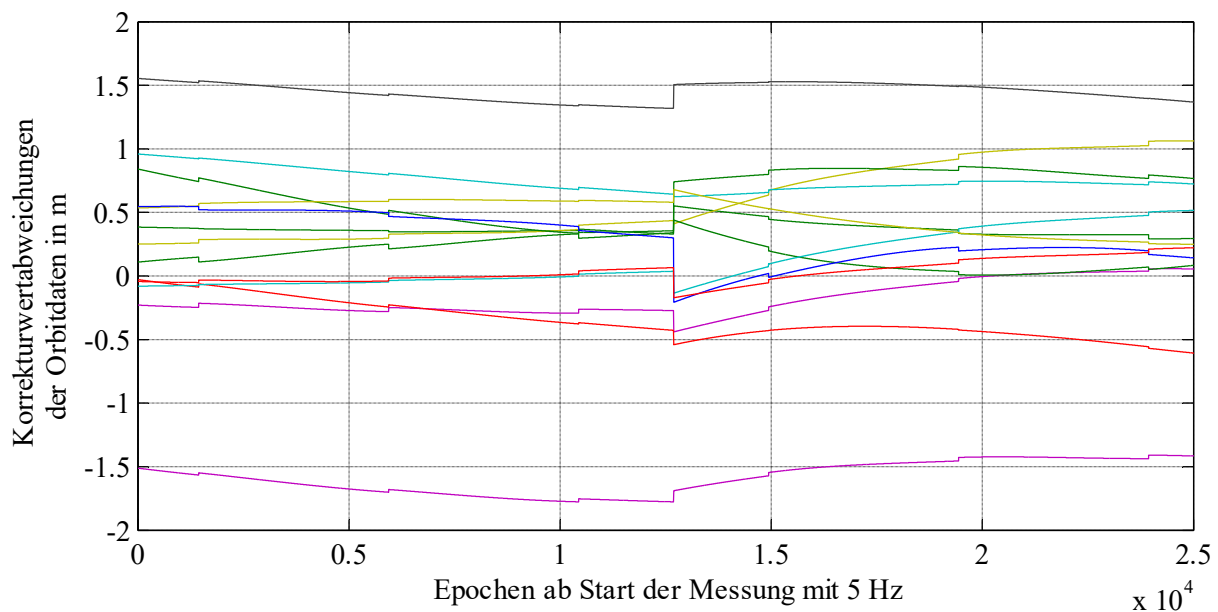


Abbildung 7-2: Differenzen zwischen präzisen Orbitdaten und den Orbitdaten aus der Navigationsnachricht in x im ECEF Koordinatensystem für die einzelnen Satelliten

Da die Uhrenabweichung auf dem gleichen Verfahren und den gleichen Messdaten basiert, wird an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung verzichtet.

7.4.4 Verifikation der Troposphärenabweichung

Die Korrekturwertabweichungen sind für einzelne Satelliten in Abbildung 7-3 dargestellt. Dabei geht aus den Messungen hervor, dass das implementierte Standardatmosphärenmodell bei Regen größere Abweichungen aufweist. Während die dargestellten Messwerte, wenn sie in die Abweichungen im Zenit umgerechnet werden, mit denen von Kos et al. und Penna et al. übereinstimmen, weisen die dargestellten Messwerte für den Zeitpunkt des Eintreffens des Regens größere Abweichungen auf [vgl. Kos et al. 2009; Penna et al. 2001]. Die Laufzeitverlängerungen von Janes et al. sind daher etwas geringer als hier dargestellt [vgl. Janes et al. 1991]. Werden jedoch die dortigen Angaben zur Temperatur und Luftfeuchte auf die während der Messfahrt vorliegenden Bedingungen übertragen, sind die Abweichungen ähnlich. Auch die in den Fachbüchern angegebenen Laufzeitverlängerungen von Misra & Enge und Kaplan & Hegarty weisen eine ähnliche Größenordnung auf [vgl. Misra/Enge 2011; Kaplan/Hegarty 2005]. Damit gilt die Implementierung der Bestimmung der Korrekturwertabweichungen für den Einfluss der Troposphäre als erfolgreich verifiziert. Die Korrekturwertabweichungen zweier Satelliten sind nicht über den gesamten Zeitverlauf aufgetragen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Satelliten den Maskierungswinkel von 10° über- bzw. unterschritten haben.

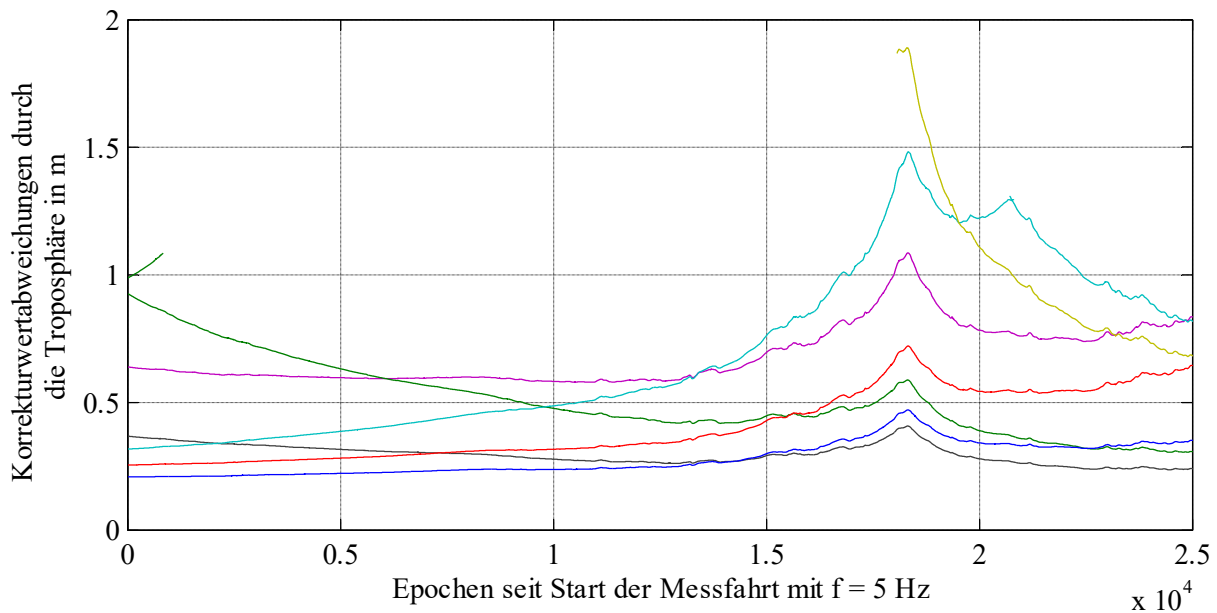


Abbildung 7-3: Korrekturwertabweichungen durch die Troposphäre für einzelne Satelliten

7.4.5 Verifikation der Ionosphärenabweichung

Die ionosphärischen Korrekturwertabweichungen in Abbildung 7-4 zeigen, dass fast die gesamten Abweichungen negativ sind. Dieses Verhalten wurde zusätzlich von Opitz et al. für statische Anwendungen identifiziert [vgl. Opitz et al. 2007]. Die dynamische Genauigkeit der EGNOS-Daten weist in dem Beitrag neben einigen groben Messabweichungen zusätzlich ein ähnliches Verhalten auf, wobei zwei Satelliten positive Abweichungen nach Korrektur der EGNOS-Daten besitzen.

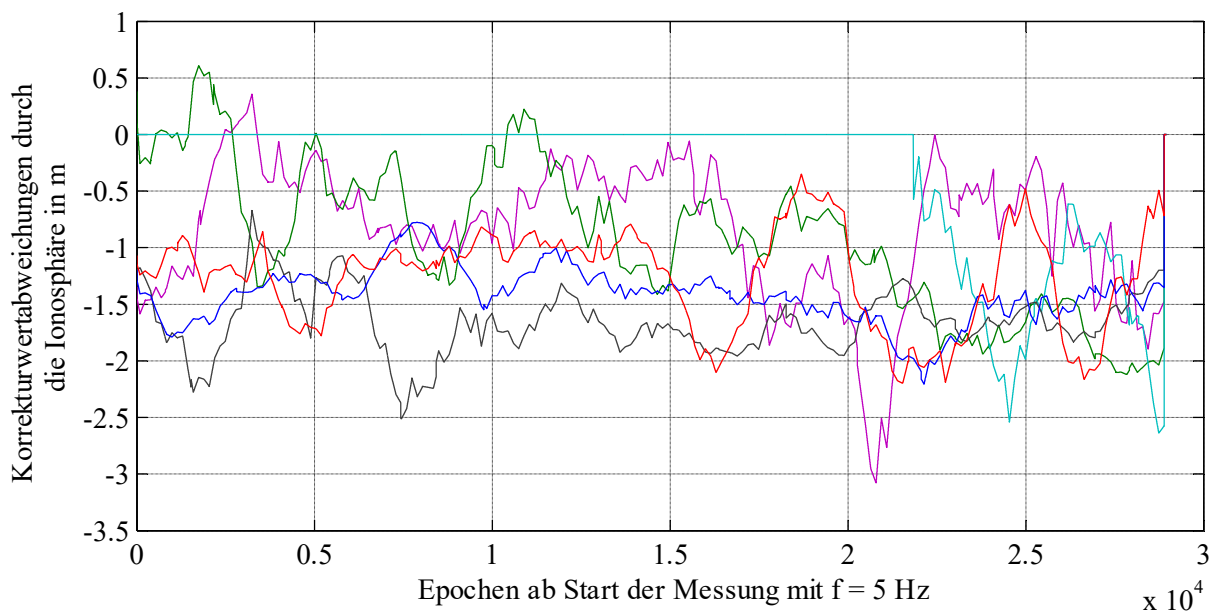


Abbildung 7-4: Korrekturwertabweichungen durch die Ionosphäre für einzelne Satelliten

In der gleichen Größenordnung wurden auch die ionosphärischen Laufzeitabweichungen für das nach dem gleichen Prinzip arbeitenden WAAS-System identifiziert. Messabweichungen größer 2,5 m sind dabei sehr rar. [vgl. Kim/Lee 2015].

7.4.6 Verifikation der Implementierung der Ortsberechnung

Der Kleinste-Quadrate-Algorithmus zur Bestimmung des Orts wurde anhand der ermittelten Referenzorte verifiziert. Dafür wurden in einem ersten Schritt zu fest definierten Zeiten die geometrischen Distanzen bestimmt und anschließend basierend auf den Satellitenorten und den geometrischen Distanzen die bmOs bestimmt. Die dabei berechneten Orte wurden anschließend mit den Referenzorten verglichen. Die Differenz zwischen dem Referenzort und dem berechneten Ort für die Ephemeriden und Observationen liegt im Bereich um 10^{-1} m. Diese geringen Differenzen werden als Nachweis für die korrekte Implementierung des Ortslösealgorithmus und der Satellitenortsalgorithmen interpretiert.

7.5 Auswertung des bestmöglichen Orts

Um möglichen Entwicklern Verbesserungspotenziale auf den einzelnen Einflussebenen aufzuzeigen, ermöglicht CONCAL die spezifische Untersuchung der Einflüsse auf die Pseudodistanz und das Messergebnis. Abbildung 7-3 zeigt die Differenz zwischen den auf Basis der Standardatmosphärenparameter geschätzten troposphärischen Laufwegverlängerung und der aus gemessenen Daten der Referenzstation ermittelten Laufwegverlängerung für die einzelnen Satelliten.

Die berechneten Trajektorien sind in Abbildung 7-5 für eine Open Sky Messung in UTM-Koordinaten dargestellt. Ersichtlich ist, dass die Referenztrajektorie (rote Kreuze) und die bmO-Trajektorie (schwarze Sterne) ein ähnliches Verhalten aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einflüsse sich nur mit geringen Gradienten ändern. Etwas oberhalb der Mitte der Abbildung ist ein kleiner Sprung in der bmO-Trajektorie ersichtlich. Dies ist auf die Reduktion der Anzahl der Satelliten durch die Absenkung eines Satelliten unter die Maskierungsgrenze zurückzuführen.

Die Messtrajektorie des Prüfgegenstands (blaue Kreise – durchfahren von Süd nach Nord) zeigt einen wechselnden Verlauf. Im unteren Teil der Abbildung folgt die Messtrajektorie der Trajektorie des bmO (schwarz), zur Mitte hin weist die Messtrajektorie erst eine größer werdende und anschließend kleiner werdende Abweichung auf, bevor sie sich zum oberen Ende des Bildes wieder der Trajektorie des bmO annähert. Die Messreihe wird im folgenden Kapitel 8 anhand der in Kapitel 5 spezifizierten Qualitätsmerkmale näher analysiert.

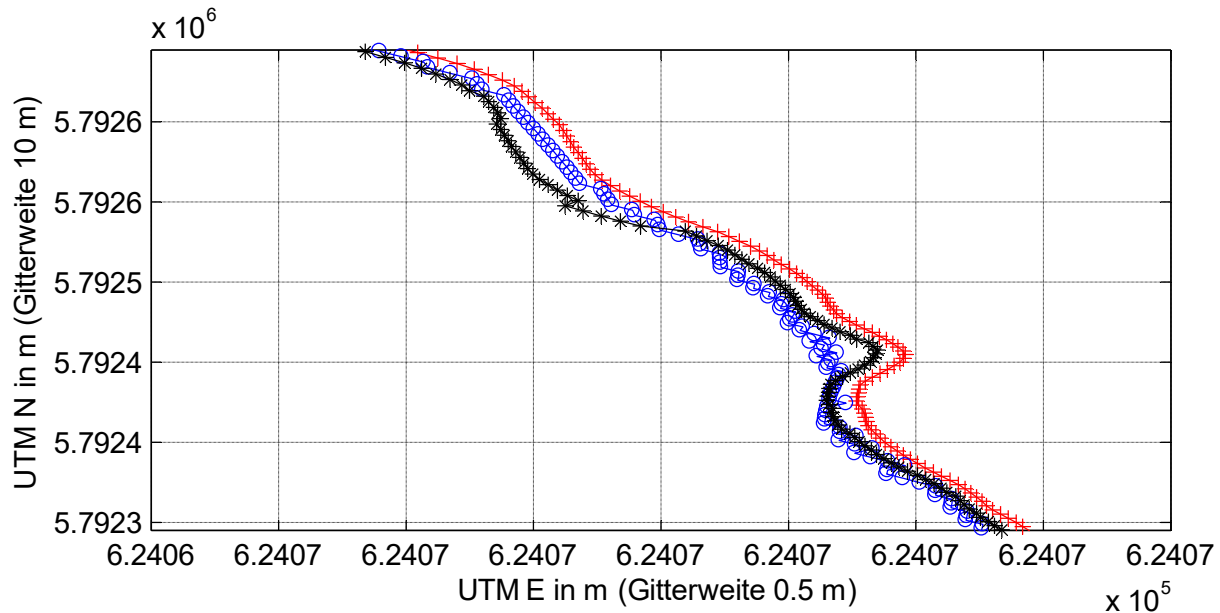


Abbildung 7-5: Trajektorien während der Qualifizierung. Trajektorie des Prüfgegenstands (○ - blau). Referenztrajektorie (+ - rot), Trajektorie zur Beschreibung der vorherrschenden Messbedingungen (* - schwarz).

7.6 Bestimmung der Messunsicherheit für die bestmögliche Ortsschätzung

Die Messunsicherheit wird nach dem allgemeinen Verfahren der Messunsicherheitsanalyse (siehe Unterkapitel 6.4) anhand einer Monte-Carlo Simulation bestimmt. Dafür werden die Referenzwerte der einzelnen Einflüsse entsprechend ihrer Messunsicherheit (siehe Unterkapitel 3.11) zufällig variiert.

Die Messunsicherheiten der einzelnen Einflüsse werden anschließend für die sichtbaren Satelliten auf die geometrische Distanz aufsummiert. Der mit einer Unsicherheit behaftete Referenzort dient als Ausgangspunkt der geometrischen Distanz. Der Einfluss der Messunsicherheit der Referenzorte ist jedoch vernachlässigbar, da sich der radiale Abstand nur geringfügig ändert und die ionosphärischen und troposphärischen Korrekturabweichungen deutlich größere Abweichungen aufweisen.

Durch eine große Anzahl von Simulationen wird die Häufigkeitsverteilung sichtbar und so die Messunsicherheit bestimmbar. Nach Gleichung 6-16 wären für eine 95-prozentige Wahrscheinlichkeit der überdeckten Messwerte im Intervall 200.000 Simulationen gefordert. Verschiedene Simulationen haben jedoch gezeigt, dass die Anzahl nicht ausreichend ist. Deshalb werden in CONCAL eine Million Simulationen zu jedem Messzeitpunkt durchgeführt. Für verschiedene Referenzorte wurden die Simulationsergebnisse auf ihre Verteilung geprüft und der Hypothesentest erfolgreich bestanden.

Das Ergebnis einer Monte-Carlo Simulation ist für einen Messwert in Abbildung 7-6 dargestellt. Diese zeigt, dass die Simulationsergebnisse der Form einer Messunsicherheitsellipse folgen. Diese weist eine systematische Abweichung in Nord von -0,087 m und in Ost von -0,12 m auf. Die Halbachsen der Ellipse

haben eine Länge von 0.075 m und 0.038 m bei einer Umhüllung von 95 % der Messwerte. Der Rotationswinkel der Ellipse beträgt 16 Grad.

Für die Ergebnisdokumentation werden die einzelnen bestmöglichen Ortsabweichungen um die systematischen Einflüsse korrigiert. Zur besseren Übersichtlichkeit ist die Messunsicherheitsellipse mit den größten minimalen und maximalen Abweichungen dargestellt.

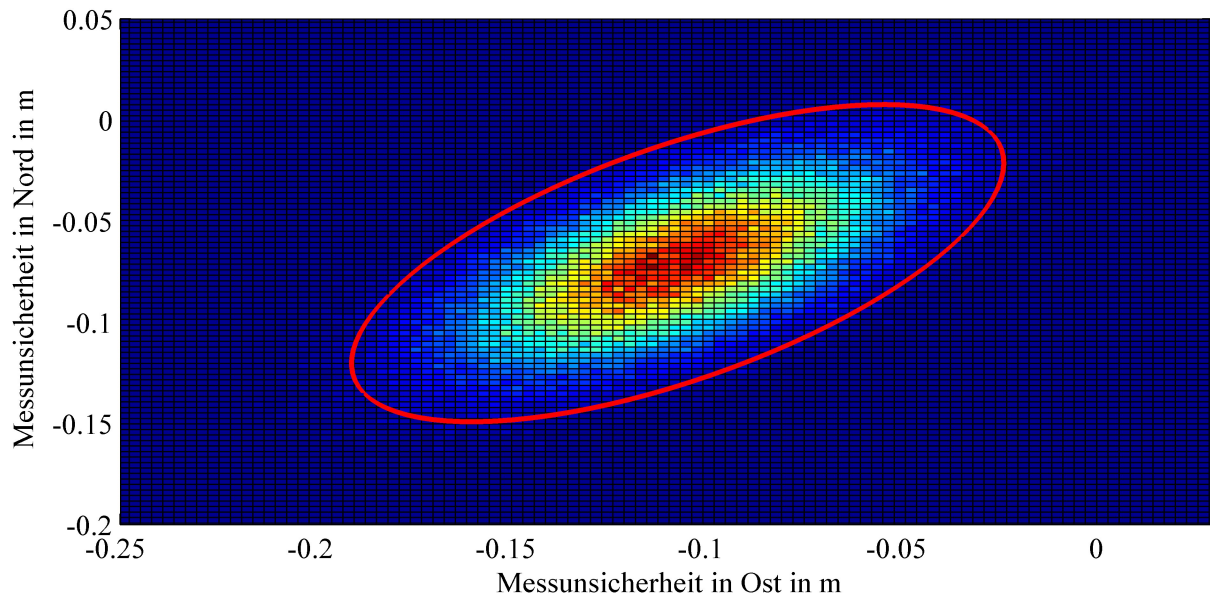


Abbildung 7-6: Auswertung der Messunsicherheit für einen Messwert (Messwert 25000) des Prüffalls Autobahn⁹. Die rote Linie grenzt den 95% Vertrauensbereich ab. Datengrundlage sind eine Mio. Simulationswerte.

⁹ Die einzelnen Prüffälle werden im folgenden Kapitel erläutert.

8 Normkonforme Ermittlung der Messqualität eines Automotive-Empfängers

In diesem Kapitel wird eine normkonforme Qualifizierung eines Automotive-GNSS-Empfängers exemplarisch durchgeführt. Dabei wird auf die in Kapitel 5 definierten Qualitätsmerkmale, den in Kapitel 6 eingeführten bmO zur Quantifizierung der Messbedingungen und das in Kapitel 7 dargestellte Programm zur Bestimmung des bmO zurückgegriffen.

8.1 Prüfsystem

Der Prüfaufbau für die durchgeführten Messfahrten ist in Abbildung 8-1 dargestellt. Das Prüfsystem besteht aus dem Prüfräger, einem Referenzmesssystem, einem Transientenrekorder und dem Prüfgegenstand. Sowohl das Referenzmesssystem, der Transientenrekorder als auch der Prüfgegenstand wurden über einen Antennensplitter an dieselbe Antenne angeschlossen. Dies hat den Vorteil, dass der Referenzort und der Ort des Prüfsystems identisch sind. Die einzelnen Elemente des Prüfsystems werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert erläutert.

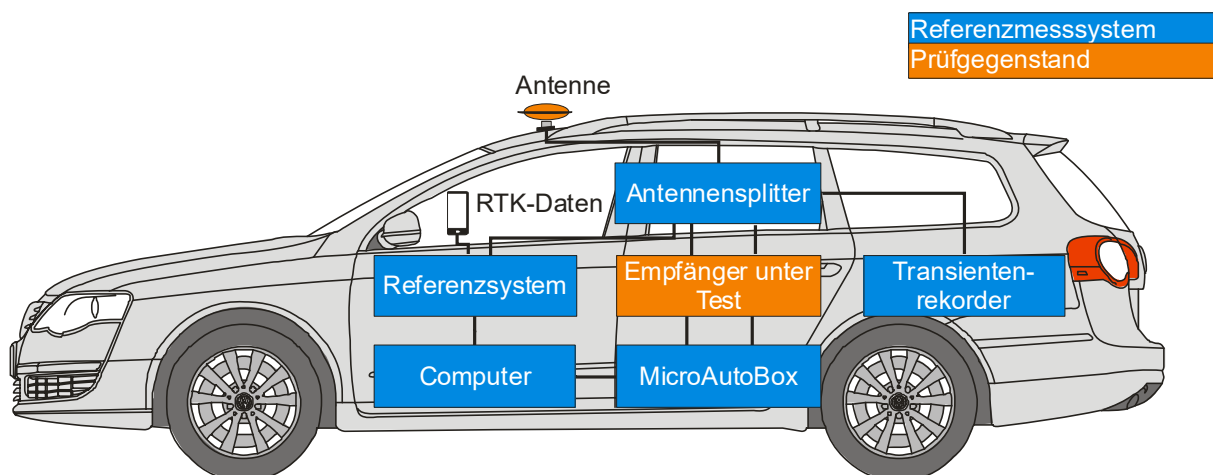


Abbildung 8-1: Prüfaufbau für die Prüffahrten

8.1.1 Prüfräger

Der Prüfräger war ein Passat des Herstellers Volkswagen. Durch den Einbau eines zusätzlichen Energiespeichers sowie der Anschlüsse konnte der Passat die nötige Energie für den Betrieb der Hardwarekomponenten über einen längeren Zeitraum bereitstellen.

8.1.2 Referenzmesssystem

Kern einer jeden Qualifizierung ist die Bereitstellung einer Referenz. Für den Fall der Qualifizierung von satellitenbasierten Ortungssystemen setzt sich die Referenz aus einem Referenzort (Koordinaten im gewählten Koordinatensystem) inklusive eines Gültigkeitszeitpunkts zusammen. Zusätzlich verlangt die ISO/IEC 17025 die Angabe der Messunsicherheit der Referenzwerte. In den allgemeinen Regelungen

des gesetzlichen Messwesens werden die Anforderungen an die Referenz mit einer Genauigkeit von 1/3 bis 1/10 der zu erwartenden Genauigkeit des Prüfgegenstands festgehalten, soweit es technisch und finanziell realisierbar ist [vgl. GM AR 108]. Verschiedene Referenzmesssysteme haben sich am Markt etabliert und werden in Tabelle 8-1 anhand der Parameter Genauigkeit, Messfrequenz, mögliche Prüffeldgröße, Erfordernis der direkten Sichtverbindung zu Transpondern oder Referenzstationen, absolute oder relative Ortung, Richtungsangabe, Resistenz in Bezug auf die Messbedingungen und Zertifizierung der Systeme verglichen.

Tabelle 8-1: Vergleich verschiedener Referenzmesssysteme für die Qualifizierung
(✓ ist erfüllt, ✗ = nicht erfüllt, + = gut, - = schlecht, O = ok) [in Anlehnung an Wegener 2013]

System	Trimble Total-Station S9 DR Plus [Trimble Germany GmbH 2016]	Symeo LPR-2D [Symeo GmbH 2016]	Inmototec LPM wireless [Stelzer et al. 2004]	OxTS INS+GNSS-RT 3002 [Oxford Technical Solutions Limited 2014]
Genauigkeit	4mm + 2 ppm (1σ)	5 - 20 cm	3 cm	2 cm (1σ)
Messfrequenz	2.5 Hz	25 Hz	1000 Hz	100 Hz
Prüffeldgröße	2500 m	400 m	1000 m	∞
Direkte Sichtverbindung benötigt	✓	✓	✓	✗
Absolute Ortung	✓	✓	✓	✓
Richtung	✗	✓	✓	✓
Beeinflussung durch Messbedingungen	-	O	O	+
Zertifiziert	✗	✗	✗	Begrenzt auf die IMU

Aus der Bewertung kann konstatiert werden, dass sich lediglich satellitengestützte Trägheitsnavigationssysteme für große Prüffelder mit lokalen Abschattungen für bodengebundene Anwendungen eignen. Ein satellitengestütztes Trägheitsnavigationssystem (OxTS RT 3002 des Herstellers Oxford Technologies) stand für die Prüffahrten bereit¹⁰. [vgl. Oxford Technical Solutions Limited 2014]

¹⁰ Dabei wird angenommen, dass die Messunsicherheit des Referenzmesssystems unter den Abweichungen des Prüfgegenstands untergeht.

Eine solche Einheit basiert auf einem zertifizierten Trägheitsmesssystem (Beschleunigungssensoren und Gyroskopen) und einem Mehrfrequenz-multi-GNSS-Empfänger. Trägheitssysteme stellen relative Beschleunigungen bereit. Um die Daten in einen globalen Kontext zu setzen und die Drift der Sensoren zurückzusetzen, bedarf es einer globalen Referenz. In diesem Fall wurde der GNSS-Empfänger dafür genutzt. Um die höchste Genauigkeit zu erzielen, ist folglich ein hochgenauer GNSS-Empfänger notwendig. Aus diesem Grund ist in dieses System ein Mehrfrequenzempfänger integriert, der im RTK-Modus betrieben wurde. Dies bedeutet, dass der Prüfgegenstand in Echtzeit mit Korrekturdaten von einer lokalen oder virtuellen Referenzstation arbeitet. Die Korrekturdaten stammen vom nationalen Korrekturdienst (AXIO-NET), der die zertifizierten geforderten Daten mit einer Genauigkeit von ± 2 cm bereitstellt (1σ normalverteilt) [vgl. AXIO-Net GmbH 2015]. Für die Messfahrten wurde eine virtuelle Basisstation auf das Dach des Institutsgebäudes am Langen Kamp 8, Braunschweig gesetzt. Dies ermöglichte, eine maximale Basislinie von 20 km einzuhalten. Bei Basislinien kleiner als 20 km wird allgemein davon ausgegangen, dass jegliche Einflüsse der Korrekturdaten durch die Distanz (z. B. ionosphärische und troposphärische Bedingungen) auf das Messergebnis vernachlässigbar sind (ausgenommen lokale Effekte) [vgl. Kaplan/Hegarty 2005].

Wird das Referenzmesssystem in diesem Modus betrieben, hat der Hersteller die bestmögliche Genauigkeit mit 0,02 m (1σ normalverteilt) spezifiziert [vgl. Oxford Technical Solutions Limited 2014: 2]. Darüber hinaus bestimmt das Referenzmesssystem ein Konfidenzintervall für die Ortsdaten. Dieses ist abhängig von den lokalen Umgebungen, dem Alter der Korrekturdaten und weiteren nicht bekannten Parametern.

Durch die Zertifizierung des Trägheitssystems und die zertifizierten Korrekturdaten wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Angabe über die Messunsicherheit des Referenzmesssystems korrekt ist. Wird der Anspruch der Referenzbereitstellung auf ein differentes Messprinzip streng ausgelegt, dürfte dieses Messsystem nicht verwendet werden. Da die Einflüsse auf die Genauigkeit durch die Bereitstellung von Korrekturdaten korrigiert werden und das gleiche Referenzmesssystem in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für die Quantifizierung von videobasierten Abstandsmesssystemen [vgl. Märten et al. 2014] und Neigungsmessung von Polizeimotorrädern [vgl. Grohne et al. 2012] eingesetzt wurde, wird das Referenzmesssystem als geeignet angenommen.

Darüber hinaus wurde eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Die abgefahrenen Trajektorien wurden in Satellitenbildern bei Google Earth dargestellt und es wurde überprüft, ob die Trajektorie den abgefahrenen Straßen gefolgt ist. Hierbei zeigte sich, dass die Trajektorie auf Parkplätzen und Fahrspuren sowohl in offener Messumgebung als auch in der komplexen Messumgebung der Stadt stets ungefähr mittig den Fahrstreifen gefolgt ist. Darüber hinaus waren Fahrstreifenwechsel und Haltezeiten vor Lichtsignalanlagen eindeutig nachvollziehbar. Auch bei länger nicht vorhandenen Korrektursignalen (> 3 min) wurde der Fahrstreifen aus den Satellitenbildern nicht verlassen.

Vor dem Start der Qualifizierung muss das Referenzmesssystem kalibriert werden (siehe 4.2.4). Die Kalibrierung besteht aus der relativen Abstandsmessung vom Antennenzentrum auf dem Fahrzeugdach bis zum Zentrum der Trägheitssensorik. Die Abstände wurden mithilfe eines Gliedermaßstabs gemessen. Dies ist an dieser Stelle möglich, da das Referenzmesssystem diese Werte bei der Selbstkalibrierung korrigiert. Bei der Selbstkalibrierung werden diese Parameter während der Aufwärmphase und während bestimmter Fahrmanöver bestimmt und aktualisiert. Ist das Messsystem bereit, gibt es einen akustischen sowie visuellen Hinweis aus [vgl. Oxford Technical Solutions Limited 2015].

8.1.3 Transientenrekorder

Um die Wiederholgenauigkeit spezifizieren zu können, wurde während der Prüffahrt ein Transientenrekorder (Spirent GSS 6425) mitgeführt [vgl. Spirent 2014]. Der Transientenrekorder wurde direkt über den GNSS-Splitter an die Antenne angeschlossen. Die ausgewählte aktive Antenne verstärkt die relativ schwachen GNSS-Signale. Danach werden die Signale in dem Transientenrekorder weiter bis auf das optimale Niveau für den Transientenrekorder verstärkt. Im nächsten Schritt werden die RF-Signale direkt auf eine Zwischenfrequenz konvertiert und anschließend durch einen Analog/ Digitalkonverter in I-Q-Daten digitalisiert. Die I-Q-Daten stellen dabei die Amplitude und die Phase des Signals dar. Beide Datensätze werden abschließend auf einer Festplatte gespeichert und können bei Bedarf wiederholt abgerufen werden. Zum Abspielen der Daten wird der Prozess umgekehrt. Nähere Informationen zu Transientenrekordern finden sich in [Richter et al. 2013a].

Der Einfluss der Qualität von Transientenrekordern auf das Messergebnis ist bis heute nur sporadisch untersucht worden. Dabei ist insbesondere die Übereinstimmung der abgespielten Signale mit den aufgenommenen Signalen derzeit noch nicht wissenschaftlich ergründet, erste Versuche wurden von Richter et al. dargestellt [vgl. Richter et al. 2013b]. Dabei kann angenommen werden, dass die Qualität der Uhr im Transientenrekorder keinen großen Einfluss auf das Messergebnis besitzt, da sich diese in der Empfängeruhrenabweichung niederschlägt. Bei dem Vorgang der analog-digitalen und digital-analogen Wandlung kann es zu größeren Einflüssen kommen, was sich in dem Signal-zu-Rausch-Verhalten äußern würde. Es konnte festgestellt werden, dass das Signal-zu-Rausch-Verhalten für die wiederholt abgespielten Messsignale ca. 1 dBHz geringer ist als bei der direkten Messung. Dieses Verhalten ist stimmig mit den Angaben vom Hersteller [vgl. Spirent 2014]. Auf dem Niveau der Ortsqualität zeigen sich keine signifikanten Abweichungen.

Insgesamt wurde die aufgezeichnete Messfahrt 13 elfmal wiederholt abgespielt. Die Anzahl elf beruht dabei nicht auf statistischen Eigenschaften, sondern auf dem Fakt der begrenzten zeitlichen Überlassung eines solchen Systems. Wie im weiteren Verlauf dargestellt wird, ist die Anzahl elf für bedingte Aussagen ausreichend.

8.1.4 Prüfgegenstand

Als Prüfgegenstand wurde ein Automotive-GNSS-Empfänger des Schweizer Herstellers u-blox verwendet. Dieser Empfänger wurde für den Einsatz in der Automobilindustrie konzipiert und wird dort bereits für Komfortfunktionen eingesetzt. Der Empfänger wurde mit Signalen über die Antenne des Referenzmesssystems versorgt. Die berechneten Ortsinformationen und weitere Rohdaten wurden dabei direkt vom Messcomputer mit der Herstellersoftware U-Center aufgezeichnet und parallel über eine serielle Schnittstelle an ein Echtzeitsystem (DSpace MicroAutoBox) übertragen. Der Einsatz eines Echtzeitsystems ist nötig, um die Ortungslatenz und -korrektur zu bestimmen. Zusätzlich zu den Ortsdaten wurde das vom GNSS-Empfänger bereitgestellte PPS-Signal direkt auf dem Echtzeitrechner aufgezeichnet. Durch die hohe Genauigkeit des PPS-Signals des GNSS-Empfängers wird das Signal als Referenzwert in der Berechnung angenommen.

Eine der wichtigsten Eigenschaften für die Ortung ist die Taktfrequenz des Prüfgegenstands. Der gewählte Prüfgegenstand ermöglicht eine Bereitstellung von Ortsdaten mit einer Taktfrequenz von bis zu 10 Hz. Diese ist jedoch nur möglich, wenn keine Korrekturdaten ausgewertet werden sollen. Da Korrekturdaten die Ortsgenauigkeit stark verbessern, wurde die für diese Konfiguration maximal mögliche Taktfrequenz von 5 Hz ausgewählt. Darüber hinaus ist für viele Anwendungen die Taktfrequenz von 5 Hz ausreichend.

Der GNSS-Empfänger kann anhand verschiedener Parameter konfiguriert werden: das zu nutzende Satellitensystem und Frequenz, der minimale Elevationswinkel der Satelliten zur Berücksichtigung in der Ortsberechnung, verschiedene Betriebsmodelle (Automotive, Stationäre, ...). Die gewählten Konfigurationen für die Prüffahrten sind in Tabelle 8-2 dargestellt.

Tabelle 8-2: Konfiguration des Prüfgegenstands

Parameter	Einstellwert
Satellitensysteme	GPS, EGNOS
Maskierungswinkel (Mask angle)	10°
Bewegungsfiler (Motionfilter)	Automotive
Taktfrequenz	5 Hz
Assist Now Online/Offline	wurde nicht verwendet

8.1.5 Anforderungen an Software

Während der Messdatenaufzeichnung und Auswertung wurde auf kommerzielle Standardsoftware, z. B. MathWorks MATLAB, zurückgegriffen. Diese kann nach DIN EN ISO/IEC 17025 als ausreichend validiert angesehen werden [vgl. DIN EN ISO/IEC 17025]. Zusätzlich wurden für die Auswertung verschiedene Skripte geschrieben. Diese wurden durch händische Berechnungen und durch alternative Programme validiert.

8.2 Wahl der Prüftrajektorie

Für die Prüffahrt wurde ein Prüfszenario entwickelt, das zehn verschiedene Prüffälle abdeckt (Tabelle 8-3). Dafür wurde auf die statistische Versuchsplanung zurückgegriffen [vgl. Siebertz et al. 2010]. Die einzelnen Prüffälle wurden auf Basis von qualitativen Schätzungen der erdnahen Einflüsse (Signalabschwächung, Signalabschattung und die Auftrittswahrscheinlichkeit von Mehrwegeeffekten) gebildet. Die einzelnen Einflüsse wurden auf unterschiedlichen Stufen kombiniert. Eine Übersicht der ausgewählten Prüffälle mit einer qualitativen Bewertung der erdnahen Messbedingungen und der Länge der einzelnen Prüffälle ist in Tabelle 8-3 dargestellt.

Tabelle 8-3: Klassifizierung einzelner Prüffälle anhand erdnaher Einflüsse. Wertebereich von 0 – kein Einfluss bis 3 - starker Einfluss

Prüffall	Erdnaher Einfluss auf die Ortsgenauigkeit			Start km Marke	End km Marke	Länge in km
	Signalab- schwächung	Signalab- schattung	Mehrwege- effekte			
Großstadt mit Be- grünung	3	2	1	1,7	4,1	2,4
Großstadt wenig Be- gründung	2	2	2	4,2	6,4	2,2
Großstadt keine Be- grünung	1	2	3	6,5	8,9	2,4
Große Steinbrücken	3	3	3	11,7	12,4	0,7
Enge Eisenbrücken	3	3	3	12,9	13,0	0,1
Autobahndurch- fahrt 1	3	3	3	14,4	14,9	0,5
Autobahndurch- fahrt 2	3	3	3	16,5	17,3	0,8
Überlandfahrt	1	1	0	19,9	32,3	12,4
Waldfahrt	3	1	0	32,3	44,5	12,2
Autobahnfahrt	0	0	0	53,8	71,4	17,6
Stadtfahrt 1	1	1	1	0,6	1,7	1,1
Stadtfahrt 2	1	1	1	8,9	11,2	2,3
Überlandfahrt 2	0	0	0	44,6	53,4	8,8
Gesamte Fahrt				0	77,9	77,9

Um eine Verbindung der Fahrwege zwischen den Prüffällen zu gewährleisten, wurden zusätzlich drei weitere Prüffälle in das Prüfszenario eingeplant. Die Prüffälle der Großstadt (schmale Straßen mit Häusern mit mindestens vier Etagen, ca. fünf Meter von der Straße entfernt) konnten somit in drei unterschiedliche Prüffälle anhand des Begrünungsgrads kategorisiert werden.

1. Die **Großstadt mit Begrünung** zeichnet sich durch belaubte Bäume aus, die deutlich über die Fahrzeugantenne hinaus die Satellitensignale und den Mehrwegesignalempfang reduzieren.
2. In der **Großstadt mit wenig Begrünung** sind kleinere Bäume vorhanden, die partiell direkte Satellitensignale und Mehrwegesignale abschwächen.
3. In der **Großstadt ohne Begrünung** ist mit vielen Mehrwegeeffekten zu rechnen.

Da kreuzende Straßen und Zwischenräume in der Bebauung vorliegen, sind die erdnahen Einflüsse als überwiegend vorhanden anzunehmen. In diesem Kontext stellte sich die Frage, wo ein Szenario beginnt und wo es aufhört. Bezogen auf die erdnahen Einflüsse gibt es keine klare Vorgehensweise. Aus diesem Grund wird sich in diesem Dokument, wie in Unterkapitel 5.3, an der Klassifizierung der Verkehrswege und der Spezialfälle orientiert. Die Szenarien Autobahndurchfahrt 1 und Autobahndurchfahrt 2 beschreiben die Fahrt durch eine offene Galerie. Bedingt durch die Prüfstrecke liegen zwischen dem Fahrstreifen und der seitlichen Öffnung 3 weitere Fahrstreifen. Die Empfangsbedingungen können somit als sehr herausfordernd kategorisiert werden.

Für die folgende Auswertung der Qualitätsmerkmale wurden die Prüffälle Autobahnfahrt und Überlandfahrt ausgewählt. Die Prüftrajektorien wurden dabei so gewählt, dass keinerlei Bebauung und nur sehr selten auftretende Abschattung die Messungen beeinflussen konnten. Somit kann angenommen werden, dass keine nennenswerte Beeinflussung durch erdnahe Einflüsse vorliegt. Während der Prüffahrten wurden die Grenzen der einzelnen Verkehrswege festgehalten und anschließend die dazugehörigen Koordinaten mithilfe des Programms Google Earth extrahiert. Der erste Messpunkt und der letzte Messpunkt eines Szenarios wurden anhand von Abstandsmessungen zu dem Geofence bestimmt. Somit gilt, dass alle Messpunkte, die innerhalb des Geofences liegen, dem Prüffall zugeordnet werden. Die Prüftrajektorie und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt als Standort für die Referenzdaten zur Bestimmung der Einflüsse sind in Abbildung 8-2 dargestellt.

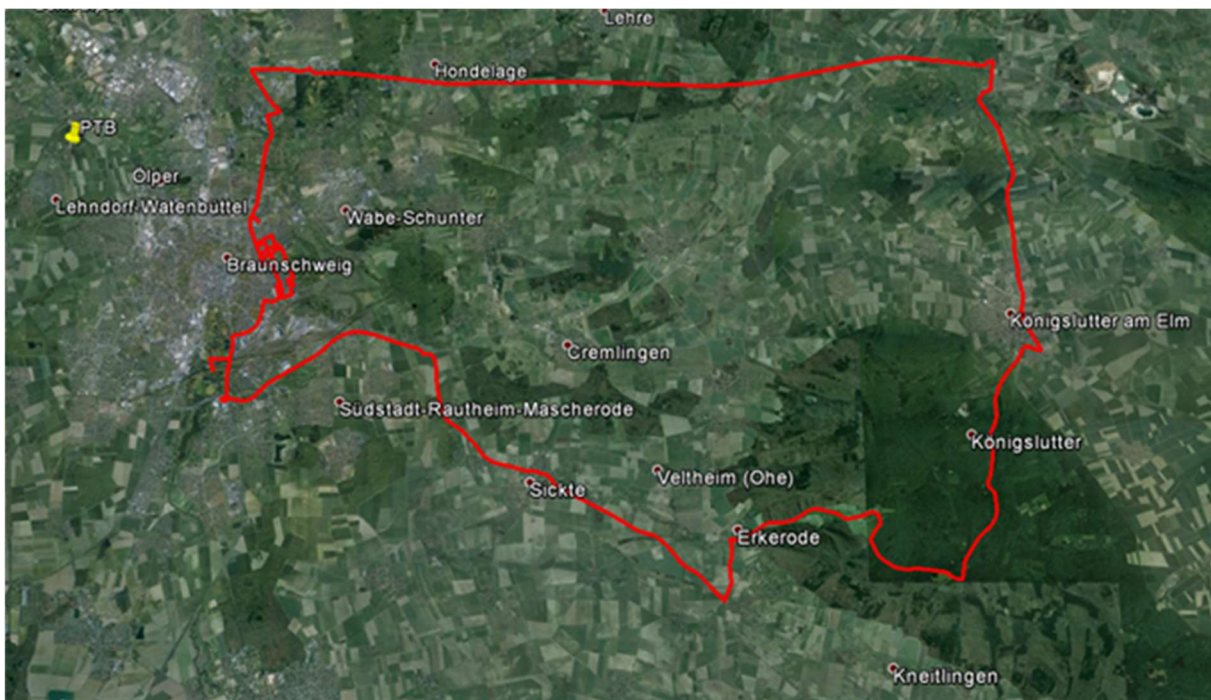


Abbildung 8-2: Darstellung der zweidimensionalen Prüftrajektorie¹¹

¹¹ Grafiken: © 2016 Digital Globe, 2016 AeroWest, 2016 GeoBasis-DE/BKG, Google

8.3 Auswertung der Qualitätsmerkmale

Die Prüffahrten wurden vom 18. - 21. August 2014 durchgeführt. Insgesamt wurden 16 Messfahrten durchgeführt und eine Gesamtstrecke von 1246 km zurückgelegt. Im Anschluss an die realen Messfahrten wurde eine willkürliche Fahrt insgesamt elfmal mit dem Transientenrekorder wiederholt abgespielt. Das Durchfahren eines Prüfzenarios erforderte insgesamt ca. 90 - 100 min. Durch die Taktfrequenz von 5 Hz des Prüfgegenstands ergeben sich somit ca. 30.000 Datensätze pro Fahrt oder eine Gesamtanzahl von ca. 480.000 Datensätzen für die realen Messfahrten.

8.3.1 Auswertung Ortsgenauigkeit

Als Basis für weitere Qualitätsparameter wird in einem ersten Schritt die Ortsgenauigkeit des Prüfgegenstandes analysiert. Die horizontalen Ortsabweichungen der 16 Prüffahrten über die zurückgelegte Wegstrecke sind ab Beginn der Prüffahrt in Abbildung 8-3 aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass im Bereich der Großstadt ab Beginn der Prüffahrt, der Brückenunterquerungen und Autobahntunnelfahrten (zusammen Streckenkilometer 0 - 17,3) und der Waldfahrt (Streckenkilometer 32,3 - 44,5) alle Messfahrten teilweise große Messabweichungen aufweisen. Hingegen weisen die Prüffälle Überlandfahrt (Streckenkilometer 19,9 - 32,3) und Autobahnfahrt (Streckenkilometer 53,8 - 71,4) mit geringen erdnahen Einflüssen sehr geringe Abweichungen auf. Lediglich kurze Ausreißer sind bei mehreren Fahrten zu beobachten; worauf diese zurückzuführen sind, ist fraglich. Eine Reduzierung der Signalstärken mehrerer Satelliten, die auf mögliche GNSS-Störer hinweisen würden, ist bei dem Prüfgegenstand als auch bei weiteren mitgeführten GNSS-Empfängern nicht zu identifizieren. Allgemein kann konstatiert werden, dass die unterschiedlichen Prüffälle zu unterschiedlichen Ortsgenauigkeiten führen.

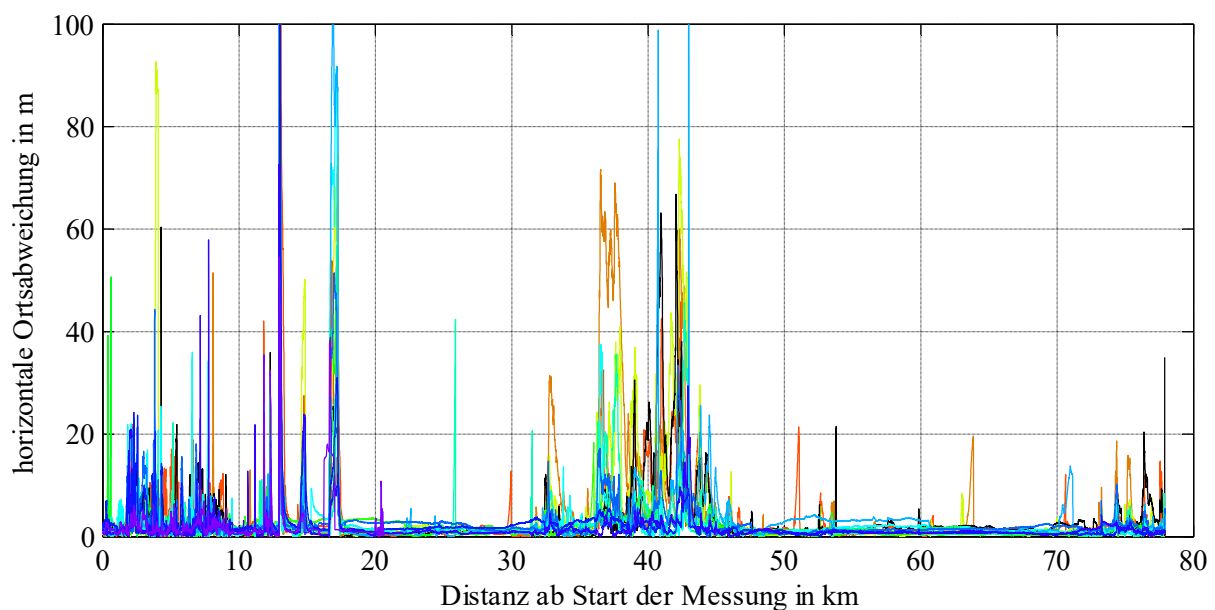


Abbildung 8-3: Horizontale Ortsgenauigkeit für das gesamte Prüfzenario für die 16 Messfahrten (eine Farbe eine Messfahrt).

Die mittleren und die 95. Perzentile der horizontalen Ortspräzisionen der einzelnen Messfahrten für die einzelnen Prüffälle und das gesamte Prüfzenario sind in Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 dargestellt. Im Anhang 1 sind darüber hinaus die Ortspräzisionen quer und längs zur Fahrtrichtung dargestellt. Wie in Unterkapitel 5.1 begründet, wird an dieser Stelle auf eine Bereinigung des Datensatzes hinsichtlich der Ausreißer verzichtet, da kein besonderer Grund für die groben Messabweichungen zu identifizieren ist. Aus den Werten wird ersichtlich, dass Prüffahrten in herausfordernden Messumgebungen große Schwankungen aufweisen. Beispielsweise variiert die mittlere Ortsabweichung in der Großstadt mit wenig Begrünung im Bereich von 1,03 m bis zu 5,23 m. Im Gegensatz dazu ist die absolute Streuung der Ortsabweichung der Autobahnfahrt im Bereich von 0,47 m bis 2,32 m deutlich geringer. Die Szenarien der Stein- und Eisenbrücken sind auf Grund einer geringen Anzahl von verfügbaren Messwerten (ca. 10 bei der Steinbrücke, ca. 80 bei der Eisenbahnbrücke) pro Messfahrt nicht besonders aussagekräftig.

Tabelle 8-4: Mittlere Ortspräzision für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	Mittlere horizontale Ortsabweichung in m																
Großstadt mit Begrünung	8,7	6,2	5,8	4,4	10,6	5,2	4,5	3,2	2,2	2,6	7,4	7,4	2,4	5,9	3,2	2,1	5,1
Großstadt wenig Begrünung	5,2	4,9	1,6	1,2	1,0	3,7	1,5	1,9	1,5	4,9	2,1	2,9	1,1	2,1	1,1	1,3	2,4
Großstadt keine Begrünung	14,0	5,0	2,5	3,0	2,5	5,6	1,7	1,6	1,5	1,6	4,2	3,2	1,4	2,2	2,8	2,4	3,5
Große Steinbrücken	5,3	6,6	2,1	4,8	3,5	5,9	5,9	2,6	3,5	5,5	3,5	5,5	4,3	2,9	2,7	6,0	4,4
Enge Eisenbrücken	52,3	125,1	83,0	105,4	43,2	48,0	133,0	55,1	44,7	49,4	104,1	61,7	49,6	51,6	52,3	51,7	69,4
Offene Autobahndurchfahrt	55,7	14,1	14,5	5,8	30,7	10,2	13,0	5,2	11,2	3,0	11,5	4,1	7,0	15,9	13,6	3,8	13,7
Offene Autobahndurchfahrt 2	55,0	31,5	40,0	8,7	38,6	17,2	9,3	34,9	19,6	13,1	57,7	32,7	71,0	16,6	7,6	1,6	28,4
Überlandfahrt	1,0	1,1	1,4	0,9	1,6	1,0	1,5	0,8	1,3	1,4	1,4	2,2	1,1	2,0	0,8	1,3	1,3
Waldfahrt	8,3	8,4	3,3	15,9	10,3	6,3	3,3	3,2	2,1	6,6	3,4	4,6	7,1	2,6	2,6	NaN	5,9
Autobahnfahrt	NaN	1,3	0,8	1,1	0,9	1,7	0,5	0,8	1,2	0,6	1,5	1,6	2,3	0,8	0,8	NaN	1,1
Stadtfahrt 1	2,4	1,5	1,6	1,4	0,8	1,8	0,5	1,8	1,0	1,0	2,5	1,4	0,7	1,5	1,2	1,0	1,4
Stadtfahrt 2	2,9	1,9	0,9	0,8	0,9	1,6	1,8	0,7	2,1	1,0	0,7	1,2	1,6	1,9	1,5	0,7	1,4
Überlandfahrt 2	NaN	2,1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,2	1,4	1,3	0,8	1,6	1,3	2,8	1,0	0,8	NaN	1,4
Gesamte Fahrt	6,4	4,0	2,3	3,7	3,8	3,4	2,1	2,1	1,8	2,5	3,0	3,1	3,0	2,2	1,8	1,7	

Da sowohl der Hypothesentest auf Normal-, studentsche t- und Cauchy-Verteilung auf die eindimensionalen Abweichungen in Nord und Ost auf Normalverteilung zurückgewiesen als auch der Hypothesentest auf Rayleigh- und Lognormalverteilung für die zweidimensionalen Ortsabweichungen verworfen wurde, wird an dieser Stelle auf die nicht parametrische Statistik zurückgegriffen.

Die horizontale Ortsgenauigkeit wird im Folgenden in der Form des 95. Perzentil angegeben. In gleicher Weise für die Ortsrichtigkeit weist das 95. Perzentil für die unterschiedlichen Prüffälle große Schwankungen auf. Besonders bemerkenswert ist, dass im Fall der Autobahnfahrt die Werte im Bereich von 0,8 m bis 4,8 m auftreten. Generell kann konstatiert werden, dass selbst für einfachste sicherheitsrelevante

Anwendungen im Bahnbereich oder der Automobilanwendung die Genauigkeitsanforderungen mit dem hier geprüften EGNOS gestützten Automotive-Empfänger derzeit nicht zu erfüllen sind.

Tabelle 8-5: 95. Perzentil der Ortsabweichung der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern für den Prüffall)

	Prüffahrt																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	horizontale Ortsabweichung in m (95. Perzentil)																
Großstadt mit Begrünung	26,6	15,5	10,8	87,1	11,4	11,6	7,8	4,0	6,1	18,5	5,9	14,9	17,7	19,8	21,2	4,8	17,7
Großstadt wenig Begründung	11,3	12,3	4,0	2,7	15,4	4,1	3,4	3,4	19,7	4,0	1,7	8,6	10,5	2,2	4,1	3,1	6,9
Großstadt keine Begrünung	31,7	9,7	6,9	6,4	12,3	3,9	3,5	3,1	3,9	13,3	3,3	5,5	8,7	5,6	5,8	5,1	8,0
Große Steinbrücken	19,7	28,9	18,3	11,7	21,2	11,5	7,9	12,3	21,7	11,3	12,7	11,0	18,1	11,2	8,8	24,4	15,7
Enge Eisenbrücken	56,1	144,6	120,4	53,5	53,1	140,7	60,1	54,6	53,5	120,4	50,1	54,0	134,9	54,4	122,8	54,5	83,0
Offene Autobahndurchfahrt	81,5	24,9	12,2	49,6	21,4	20,2	14,3	18,0	5,8	22,2	14,5	23,6	6,0	23,5	24,0	4,5	22,9
Offene Autobahndurchfahrt 2	94,8	66,5	14,3	67,8	24,8	11,6	54,9	35,8	27,8	89,9	103,4	30,4	50,6	11,6	75,3	38,1	49,9
Überlandfahrt	2,0	2,2	1,3	2,2	1,4	3,0	1,6	1,6	1,4	1,8	2,2	3,3	2,9	1,2	2,0	4,4	2,2
Waldfahrt	24,8	24,4	59,0	35,9	25,4	8,8	7,2	4,7	24,4	8,7	18,4	5,2	12,9	8,8	13,6	NaN	18,8
Autobahnfahrt	NaN	2,2	1,3	1,5	2,7	0,8	1,0	1,9	0,8	2,2	4,8	1,7	2,3	1,1	1,4	NaN	1,8
Stadtfahrt 1	5,1	2,3	2,5	1,2	3,8	0,8	5,3	2,2	2,8	6,0	1,1	2,4	2,0	1,9	3,1	2,5	2,8
Stadtfahrt 2	8,2	3,1	1,4	1,8	5,4	3,5	1,9	4,2	1,6	1,6	2,1	2,7	1,9	2,4	1,9	1,6	2,8
Überlandfahrt 2	NaN	6,7	1,7	2,9	3,3	2,5	2,6	2,1	1,7	3,8	6,4	1,7	2,3	1,4	1,9	NaN	2,9
Gesamte Fahrt	25,0	13,3	14,1	16,1	11,6	5,7	5,0	3,8	8,7	8,8	8,6	6,5	9,9	3,8	5,9	4,6	

8.3.2 Auswertung der Vergleichsfahrten

Basierend auf den 16 absolvierten Vergleichsfahrten wird die Ortungsqualität des Prüfgegenstands beschrieben. In Abbildung 8-4 sind für zehn Messfahrten die Ortsabweichungen der einzelnen Fahrten über die Zeit ab dem Start aufgetragen. Aus Gründen der Übersicht wurden für die Darstellung Ortsabweichungen größer als zehn Meter auf zehn Meter reduziert. Die Abbildung zeigt, dass sowohl die Großstadtfahrten mit den verschiedenen Graden der Begrünung am Beginn als auch die Waldfahrten in der Mitte und die Stadtfahrt am Ende zur Verringerung der Ortungsgenauigkeit führen. Dies ist besonders interessant, da die Messfahrten an unterschiedlichen Tagen und unterschiedlichen Satellitenkonstellationen durchgeführt wurden. Darüber hinaus lassen sich für fast alle Fahrten in den vermeintlich günstigeren Umgebungen einzelne grobe Ortsabweichungen identifizieren.

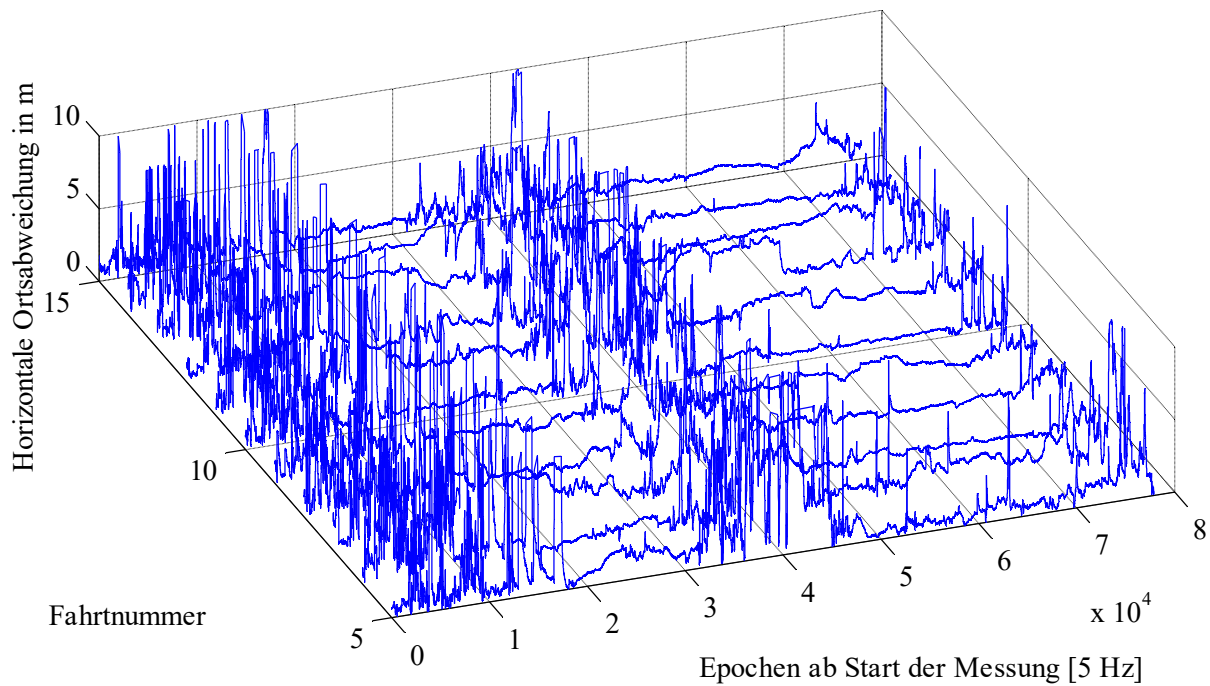


Abbildung 8-4: Ortsabweichung der einzelnen Vergleichsfahrten in dreidimensionaler Darstellung

Werden die Ortsabweichungen in Form eines Histogramms aufgetragen, lässt sich die Grundverteilung der Messwerte erkennen. Das Histogramm für die absolute horizontale Genauigkeit über alle Messfahrten und das gesamte Prüfzenario ist in Abbildung 8-5 dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen jeweils die Messwerte der einzelnen Messfahrten dar. Der Wertebereich der Abszisse wurde wegen der Übersichtlichkeit auf 15 m beschränkt, dies bedeutet nicht, dass keine Messwerte mit einer horizontalen Ortsabweichung außerhalb von 95 % vorhanden sind.

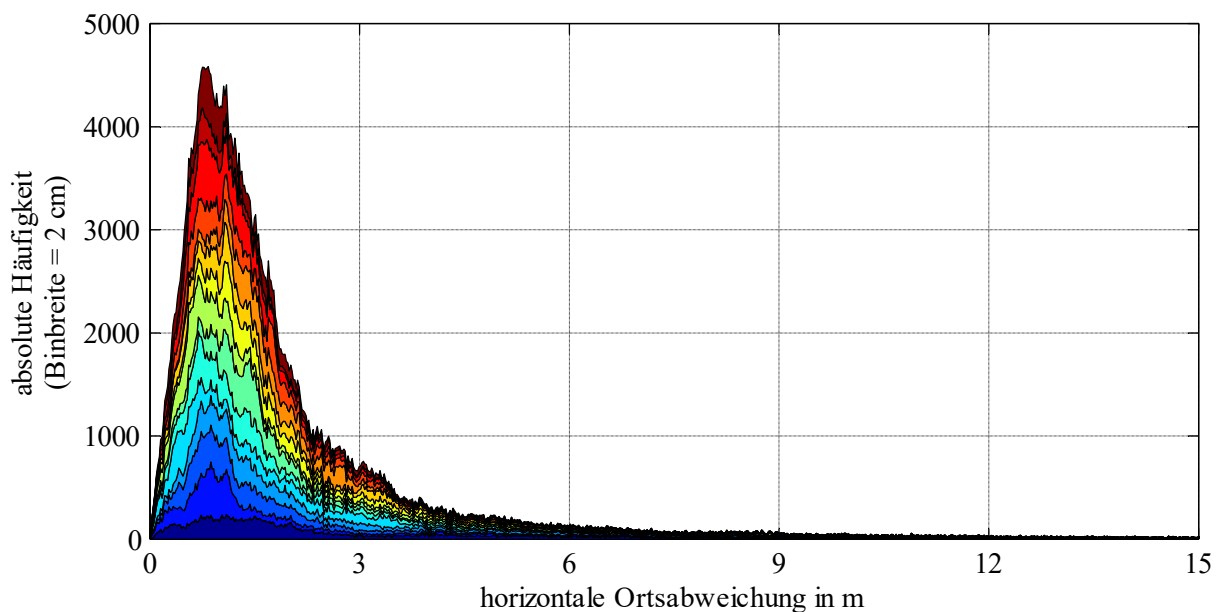


Abbildung 8-5: Horizontale Ortsabweichungen der Vergleichsfahrten in Histogrammform (eine Farbe stellt die Ortsabweichungen einer Prüffahrt dar)

Bei der Verteilungsprüfung der zugrunde liegenden Messdaten der Ortsabweichung in Nord, Ost, Quer und Längs auf die Normal-, die studentsche t- und die Cauchy-Verteilung wurden die Hypothesen auf Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ abgelehnt. Aus der grafischen Abbildung 8-6 geht hervor, dass die Messdaten im Randbereich bis zu 5 % und ab 95 % den gewählten Verteilungen nicht folgen.

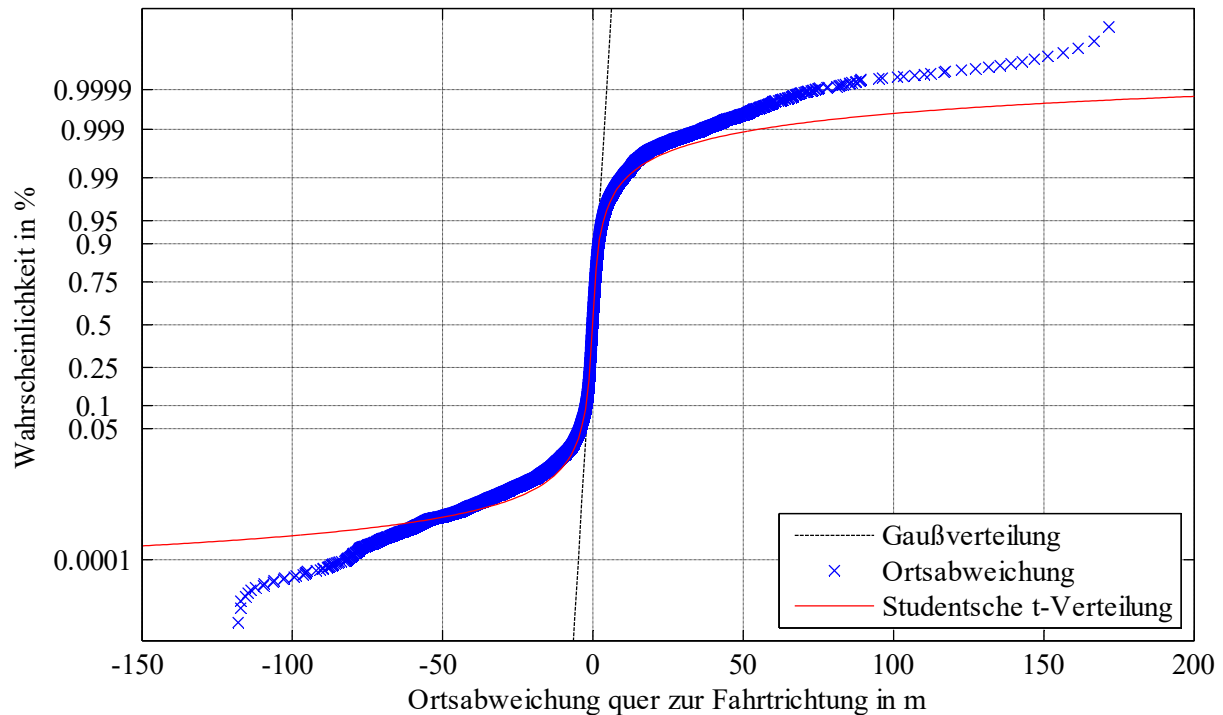


Abbildung 8-6: Wahrscheinlichkeitsplot der Querabweichung über die gesamte Fahrt der Vergleichsmessungen über die geschätzte Normal- und studentsche t-Verteilung

Die horizontalen Ortsabweichungen wurden anhand des Kolmogorow-Smirnow-Tests hinsichtlich der Grundverteilung untersucht. Dabei wurden die Hypothesen der Weibull-, Lognormal- und Rayleighverteilung auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ abgelehnt. In Abbildung 8-7 ist eine aus den Messwerten geschätzte Rayleighverteilung und die tatsächliche Verteilung der Messwerte (die blaue Linie sind die aneinandergereihten einzelnen Messwerte) dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass im Bereich von 3 m die breiten Flanken ansetzen und nicht der Verteilungsform folgen. Folglich wird die Vergleichbarkeit der Messwerte durch Perzentile beschrieben. Der Median der Vergleichsfahrten liegt bei 1,38 m und das 95. Perzentil liegt bei 9,6 m.

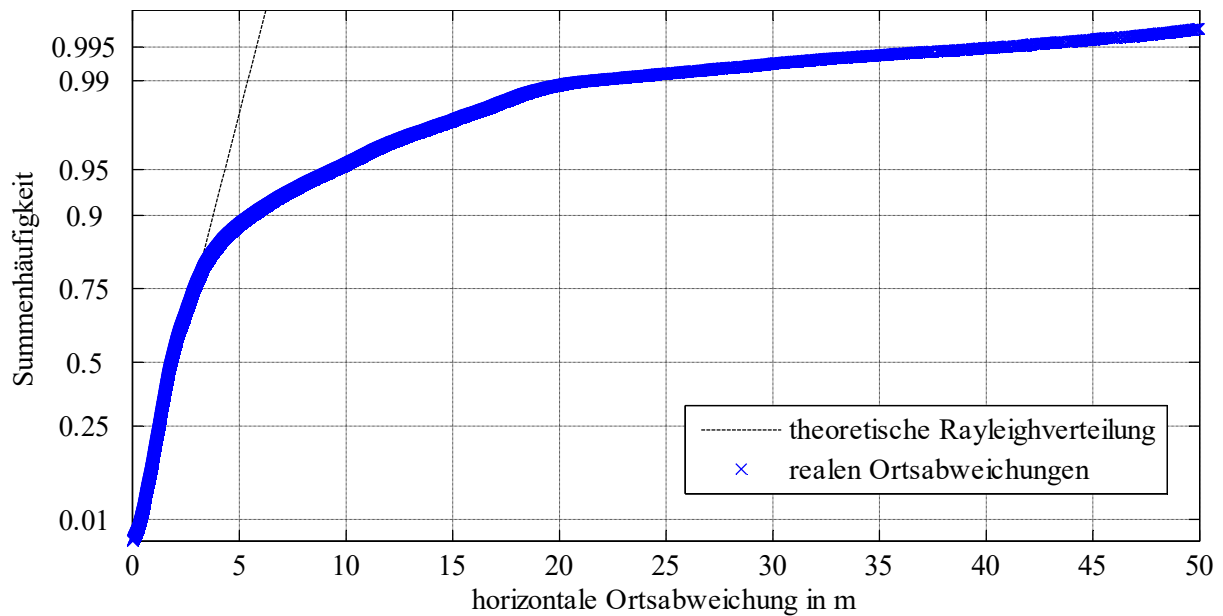


Abbildung 8-7: Häufigkeitsdiagramm der horizontalen Ortsabweichung über die gesamte Fahrt der Vergleichsmessungen über die geschätzte Rayleighverteilung

Aus diesem Grund wird das in Unterkapitel 5.4.3.2 vorgestellte Verfahren auf die Vergleichbarkeit angewandt. Abbildung 8-8 zeigt die empirischen relativen Summenhäufigkeitsfunktionen der 16 Messfahrten für den Prüffall Autobahn. Es wird ersichtlich, dass die Genauigkeit der einzelnen Fahrten stark streut. Ein großer ausdauernder Ausreißer ist bei Messfahrt elf zu verzeichnen.

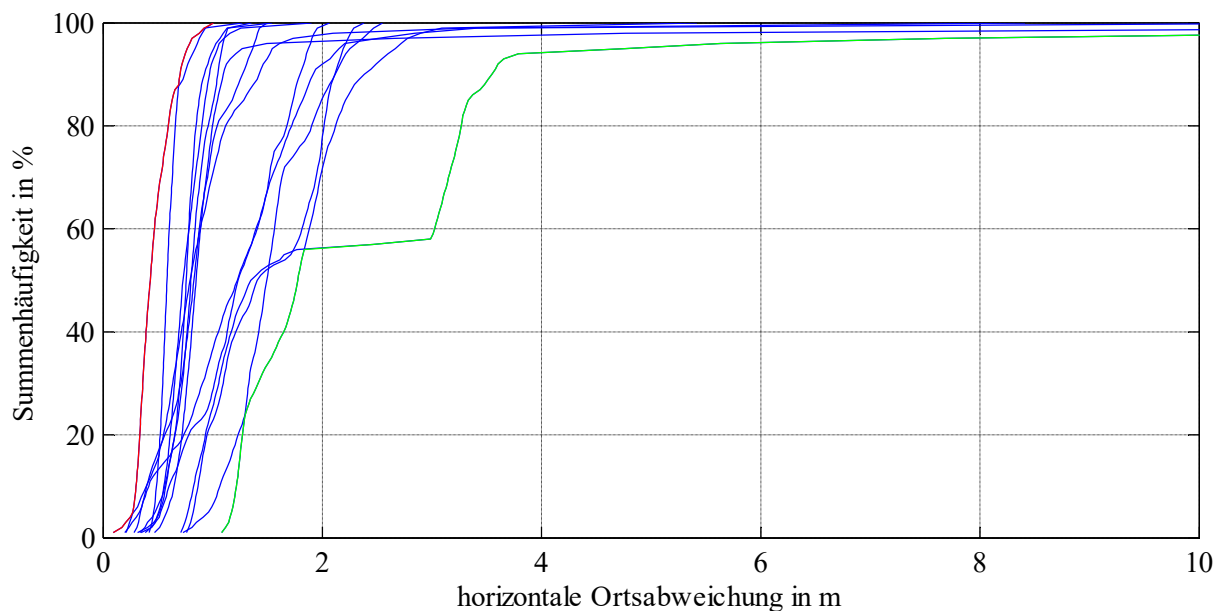


Abbildung 8-8: Summenhäufigkeit für die Vergleichsfahrten für den Prüffall Autobahn. (Rote und grüne Linie symbolisieren die untere und obere Schranke)

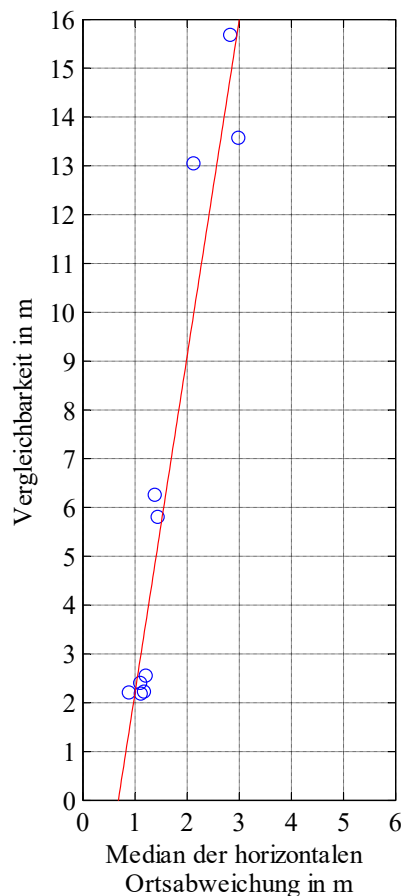


Abbildung 8-9: Vergleichbarkeit des GNSS-Empfängers für verschiedene Prüffälle kombiniert mit einer Regressionsgeraden

Die Vergleichsfahrten aus Abbildung 8-9 sind in Abbildung 8-8 als die mittlere Fläche zwischen der oberen und unteren Schranke für die Prüffälle mit einer Messwertanzahl (> 100) dargestellt. Die Sonderfälle der Brücken und Tunnel wurden für diese Bestimmung ausgeschlossen, da große Sprünge in den relativen Häufigkeitsverteilungen sichtbar waren. Die Sprünge sind auf die geringe Anzahl der Messwerte zurückzuführen und wurden als nicht ausreichend empfunden. Aus Abbildung 8-9 kann der Rückschluss gewonnen werden, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Vergleichbarkeit und dem Median der horizontalen Ortsabweichung besteht. Die Residuen sind sowohl positiv als auch negativ und folgen keinem Trendverhalten. Die Steigung der Regressionsgeraden liegt bei 7,08.

8.3.3 Auswertung der Wiederholgenauigkeit

Die Wiederholgenauigkeit des Prüfgegenstands wird auf der Basis der aufgezeichneten Signale mit dem Transientenrekorder aus der Prüffahrt 13 ermittelt. Es konnten elf Wiederholmessungen durchgeführt werden. Während der Abspielungen wurde das Signal über einen Signalsplitter gesplittet und zusätzlich zu dem eigentlichen Prüfgegenstand ein Empfänger höchster Qualität verbunden. Der Empfänger höchster Qualität wurde mit den gleichen Einstellungen wie der Prüfgegenstand hinsichtlich Maskierungswinkel, Frequenzmessungen, Nutzung von Korrekturdaten des EGNOS sowie der Filterung für die automobilen Anwendung konfiguriert.

Ein Ausschnitt der Wiederholmessungen ist in Abbildung 8-10 für den Prüfgegenstand dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Messfahrt in West-Ost-Richtung große Abweichungen zwischen den einzelnen Fahrten aufweist. Im Gegensatz dazu weisen die Messfahrten in Nord-Süd-Richtung geringere Abweichungen auf. Dies lässt sich damit begründen, dass, bedingt durch die Messung in den nördlichen Breitengraden ($52,27^\circ$), die Satelliten tiefer über dem Äquator stehen und Mehrwegeeffekte sich in den Gebäuden der Ost-West Richtung eher bilden können.



Abbildung 8-10: Wiederholt abgespielte Signale in unterschiedlichen Ausrichtungen¹²

Um die Trajektorien anhand der Qualitätsmerkmale auszudrücken, bedarf es der Prüfung hinsichtlich der Grundgesamtheit. Dafür werden die Messreihen in Abbildung 8-11 mit der horizontalen Ortsabweichung in Form eines Histogramms dargestellt. In dem Diagramm stellt jede Farbe den Anteil der Messwerte aus einer Wiederholfahrt dar. Die Rayleighverteilung als Resultat der quadratischen Summation zweier nicht korrelierter Messreihen lässt sich aus dem Histogramm erahnen, dennoch wird die Verteilungsannahme auf dem Signifikanzniveau von 5% verworfen. Folglich wird, wie bei der Angabe der Ortsgenauigkeit, für die Wiederholgenauigkeit auf die Angabe des 95. Perzentil und auf das Verfahren in Unterkapitel 5.4.3 zurückgegriffen.

¹² Grafiken: © 2016 Digital Globe, 2016 AeroWest, 2016 GeoBasis-DE/BKG, Google

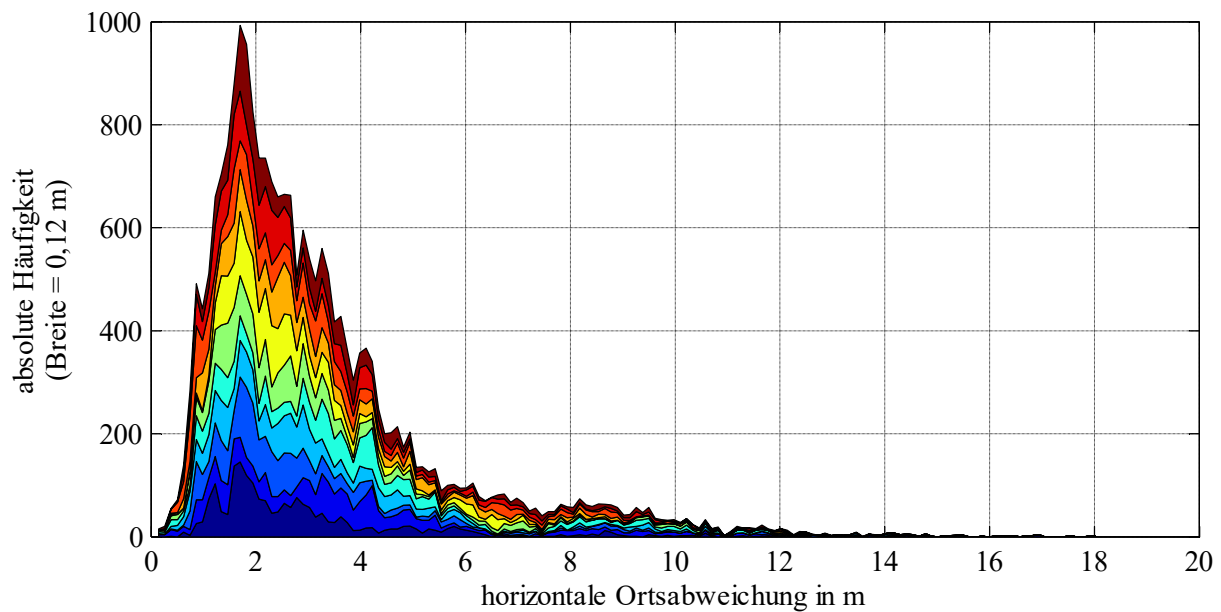


Abbildung 8-11: Histogramm der Wiederholfahrten für den Prüffall Autobahn. Das Histogramm basiert auf 11 Messfahrten und ca. 40000 Messwerten

In Tabelle 8-6 sind die 95. Perzentile für die horizontale Ortsgenauigkeit der einzelnen Prüffälle und Wiederholfahrten dargestellt. Die einzelnen Werte schwanken, wie zu erwarten, über die Messfahrten stark. Für den Fall der Autobahnfahrt liegt das 95. Perzentil im Bereich von 1,5 m bis 2,9 m. Ein ähnliches Verhalten weisen die weiteren Prüffälle auf. Aus der Tabelle geht hervor, dass die Genauigkeiten der Wiederholfahrten jeweils um die Genauigkeitswerte der Vergleichsfahrten streuen. Lediglich für den Prüffall der Eisenbahnbrücke weisen die Wiederholfahrten deutlich bessere Genauigkeiten auf. Dies ist auf die wenigen Messwerte mit Ortsinformationen bei den Vergleichsfahrten zurückzuführen. Allgemein kann konstatiert werden, dass die Ortsabweichungen der Wiederholfahrten um die Ortsabweichungen der Vergleichsfahrt 13 sowohl im Positiven als auch im Negativen streuen. Daraus wird angenommen, dass die Abspielgenauigkeit des Transientenrekorders keinen besonderen Effekt auf die Ortsqualität besitzt, da die Ortsabweichungen der Wiederholfahrten sonst deutliche größere Abweichungen aufweisen würden.

Tabelle 8-6 Ortsgenauigkeit für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten und die Ursprungsfahrt

	Wiederholfahrten												Vergleichs-
Prüffall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel	fahrt 13
	Ortsgenauigkeit (95. Perzentil) in m												
Großstadt mit Begrünung	17,7	16,9	16,4	18,0	16,9	17,5	20,8	21,8	16,4	20,1	14,8	17,9	17,7
Großstadt wenig Begründung	10,5	14,8	9,9	9,9	14,8	10,3	10,9	13,1	8,4	11,1	12,3	11,5	10,5
Großstadt keine Begrünung	8,7	9,4	8,4	9,2	9,4	7,6	6,5	7,8	8,3	7,9	8,5	8,3	8,7
Große Steinbrücken	18,1	9,0	16,3	6,2	9,0	14,2	13,9	12,4	16,7	11,4	12,7	12,7	18,1
Enge Eisenbrücken	89,3	65,8	88,0	73,3	65,8	73,3	71,6	90,3	89,2	66,9	87,6	78,3	134,9
Offene Autobahndurchfahrt	6,0	15,5	31,1	13,7	15,5	18,5	11,2	19,3	20,8	15,2	6,9	15,8	6,0
Offene Autobahndurchfahrt 2	50,6	75,2	86,9	58,2	75,2	42,5	89,9	67,7	50,0	60,4	80,3	67,0	50,6
Überlandfahrt	2,9	3,6	4,0	2,3	3,6	2,8	3,7	3,9	3,3	2,1	3,7	3,3	2,9
Waldfahrt	12,9	14,0	12,4	11,9	14,0	13,0	14,6	11,8	13,0	11,7	12,8	12,9	12,9
Autobahnfahrt	2,3	1,5	1,5	1,6	1,5	1,7	3,0	2,1	1,7	2,9	2,0	2,0	2,3
Stadtfahrt 1	2,0	1,9	1,9	1,8	1,9	1,9	2,5	3,2	1,8	1,9	2,1	2,1	2,0
Stadtfahrt 2	1,9	1,9	2,1	2,1	1,9	2,0	2,6	2,7	2,1	1,9	2,4	2,1	1,9

In Abbildung 8-12 sind die horizontalen Ortsabweichungen für drei Prüffälle mit unterschiedlichen Größenbereichen der horizontalen Ortsabweichung in Form der Summenhäufigkeitsverteilungen dargestellt (Die Wiederholgenauigkeiten für Quer- und Längsabweichungen sind in Anhang 2 dargestellt). Die Linien (rot & grün) symbolisieren dabei die Grenzwerte der einzelnen Fahrten nach unten und nach oben. Es ist ersichtlich, dass jeder Prüffall ein spezielles Verhalten hinsichtlich der Ortsabweichung darstellt. Der Prüffall Autobahn (ganz links in der Abbildung) weist nur sehr geringe Abweichungen auf und die einzelnen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen sind fast nicht zu erkennen. Im Kontrast dazu sind die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für den Prüffall Stahlbrücke eindeutig zu erkennen und zu unterscheiden. Allgemein kann aus den drei verschiedenen Prüffällen erkannt werden, dass mit zunehmenden horizontalen Ortsabweichungen die Streuung der Summenhäufigkeitsverteilungen ansteigt.

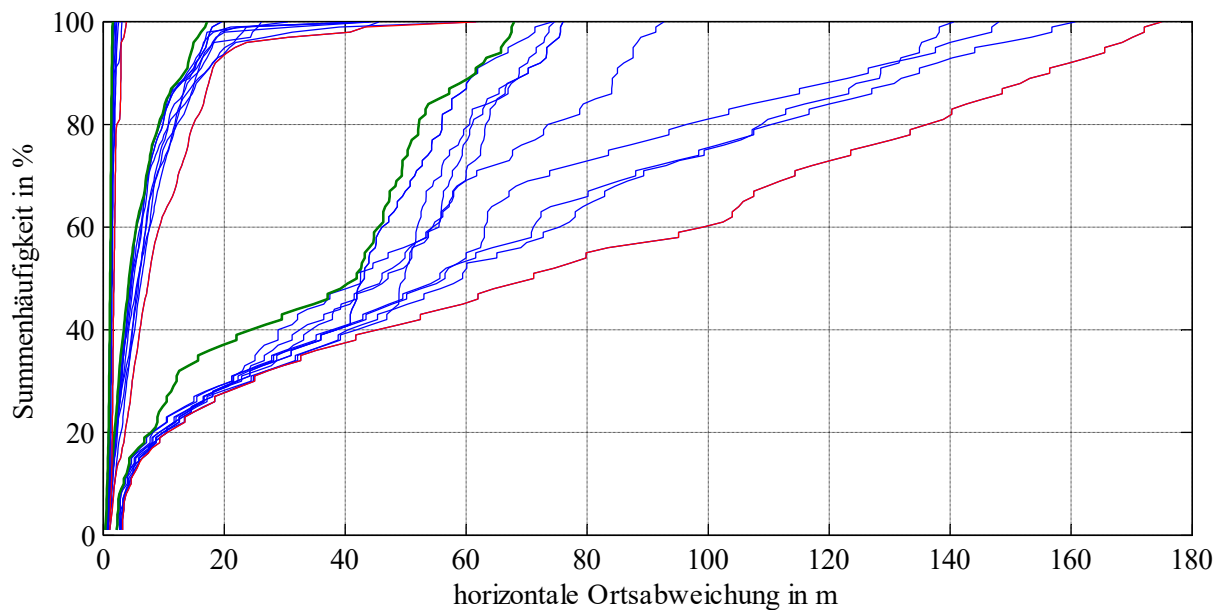


Abbildung 8-12: Summenhäufigkeitsverteilung für die Messfahrten und die wiederholt abgespielten Messsignale (blau) für drei Prüfzenarien (links: Autobahn, Mitte: Urban ohne Begrünung, rechts: Eisenbahnbrücken aus Stahl) und die jeweiligen maximalen (rot) und minimalen (grün) Werte.

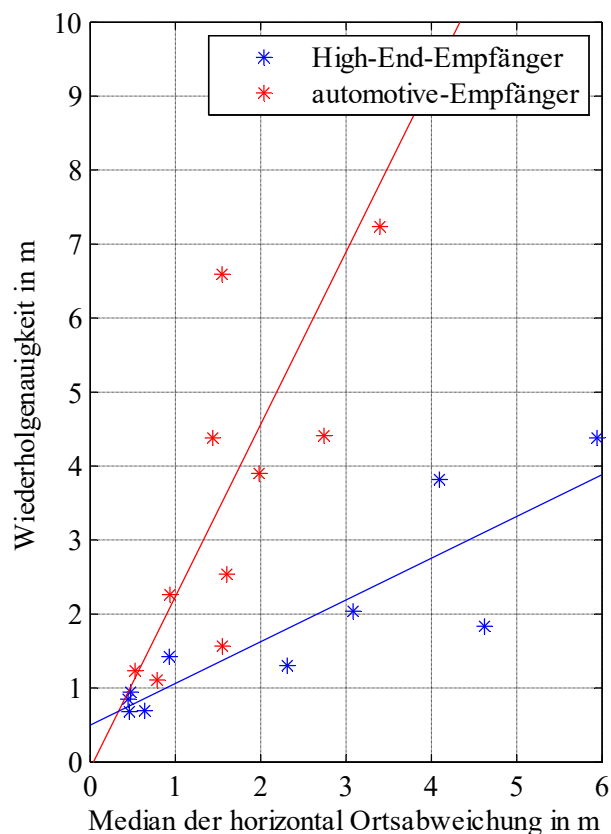


Abbildung 8-13: Wiederholgenauigkeit für zwei Empfänger während der Vergleichsqualifizierung für verschiedene Szenarien kombiniert mit den Regressionsgeraden.

Wird die eingeschlossene Fläche der einzelnen Prüffälle bestimmt, der Mittelwert der Fläche pro Perzentil berechnet und über den Median der horizontalen Ortsabweichungen aufgetragen, lässt sich Abbildung 8-13 erstellen.

Zusätzlich zu dem Prüfgegenstand ist ein Empfänger höchster Qualität für die Wiederholfahrten geprüft worden. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Wiederholgenauigkeit für den Prüfgegenstand (rot) deutlich geringer ist als die Wiederholgenauigkeit für den Prüfgegenstand höchster Genauigkeit. Die Steigung für den High-End-GNSS-Empfänger (0,56) ist dabei deutlich geringer als für den Automotive-GNSS-Empfänger (2,3).

8.3.4 Auswertung der Integrität

Der Prüfgegenstand stellt, sobald sich das System eingeschwungen hat, zu jedem Messwert ein Konfidenzintervall bereit. Der Hersteller des Prüfgegenstands gibt keine Information über den Grad des Vertrauens in das Konfidenzintervall und der angenommenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Angabe über die Protektionsgrenze in der gleichen Form wie bei der Angabe der Genauigkeit gilt und, wie üblich, die zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Normalverteilung folgt. Die Genauigkeit wird mit CEP 50 angegeben. Da in dieser exemplarischen Anwendung eine Anforderung von 99 % gilt, muss der gegebene Wert umgerechnet werden. Dafür kann auf die bekannte Fachliteratur zurückgegriffen werden. Aus der Tabelle für bivariate unkorrelierte Verteilungen ergibt sich ein Multiplikationsfaktor von 3,035. Daher weisen 99 % der Messwerte eine kleinere Abweichung auf als die $PG \cdot 3,035$.

Darüber hinaus wurden Alarmsignale vom Prüfgegenstand nicht abgegriffen. Deshalb stellt sich die Frage, ob der Hersteller die Zeit bis zum Alarm maximal ausschöpfen möchte, um eine Integritätserhöhung zu erzielen, oder ob jede Integritätsverletzung direkt gemeldet wird. In der RTCA Do-229 wird festgelegt, dass für Prüfgegenstände, die keine Alarmer bereitstellen, jede Überschreitung der Protektionsgrenze als ein Alarm definiert wird [vgl. DO-229-D]. Dieses Verhalten wurde für die folgenden Auswertungen übernommen. Für die weiteren Untersuchungen werden eine Zeit bis zum Alarm von 6 s und eine anschließende direkte Alarmauslösung angenommen. Ebenso wird eine Alarmgrenze von 5 m angenommen.

Die verschiedenen statischen Integritätszustände sind im Stanford-Diagramm in Abbildung 8-14 dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass der Hauptanteil der Messwerte in dem Quadranten der Integritätsverfügbarkeit (unten links) platziert ist. Bedenklich hingegen ist die große Anzahl von Messwerten in dem Quadranten des gefährlichen Betriebszustands (unten rechts).

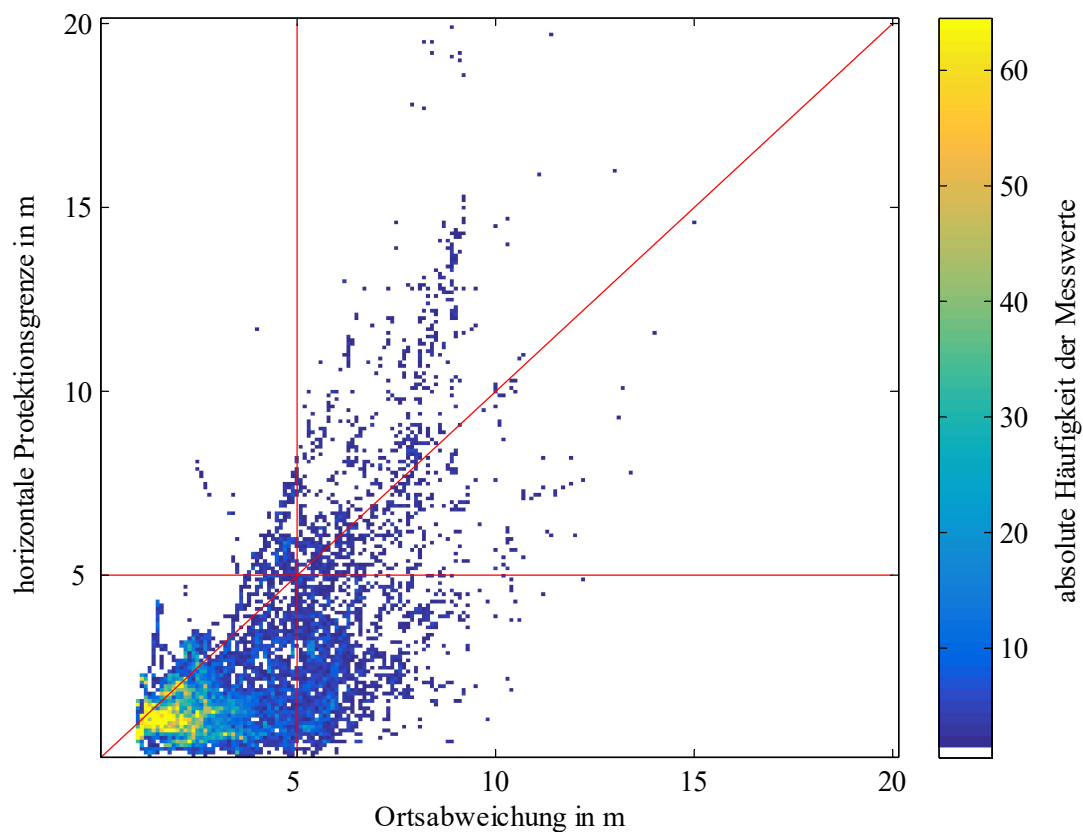


Abbildung 8-14: Stanford-Diagramm zur Integrität ohne Berücksichtigung der Zeit bis zum Alarm für eine gesamte Messreihe. Die horizontale und vertikale Linie bei 5 m stellen die Alarmgrenze dar. Die diagonale Linie symbolisiert den Unterschied zwischen sicherem ($PG > \text{Ortsabweichung}$) und unsicherem ($y(k) > PG$) Zustand.

Die statische und die dynamische Integritätsverfügbarkeit der Vergleichsfahrten sind in Tabelle 8-7 dargestellt. Es kann erkannt werden, dass ein Automotive-GNSS-Empfänger sehr weit davon entfernt ist, die geforderten Genauigkeiten für die hochsichere Fahrspurerkennung zu gewährleisten. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen aus [Salós et al. 2010], wo aufgezeigt wird, dass hohe Integritätsanforderungen in urbanen Umgebungen bisher noch nicht erfüllt werden können und in [Velaga et al. 2012], wo selbst in Kombination mit hochgenauen Karten keine zufriedenstellende Integrität geleistet werden konnte.

Eine Diskrepanz zwischen den möglichen Alarmen und den verpassten Alarmen ist darauf zurückzuführen, dass nicht jede Integritätsverletzung die Anforderungen des Falschalarm von 6 s erzielt. Dabei kann es sein, dass eine Integritätsverletzung vorliegt, die jedoch nur über einen Zeitraum von 2 s anhält. Der Prüfgegenstand hätte in diesem Fall die Möglichkeit gehabt, die Integritätsverletzung zu erkennen und zu melden, dies war jedoch nicht zwingend erforderlich.

Tabelle 8-7: Resultate der Integritätsuntersuchung für die gesamten Vergleichsfahrten über alle Prüffälle

Prüffahrt	Häufigkeit der dynamischen Integritätsverfügbarkeit in %	Anzahl Messwerte	Anzahl der statisch möglichen Alarme	Anzahl der dynamisch möglichen Alarme (TTA 6 s)	Anzahl der dynamisch verpassten Alarme (TTA 6 s)	Häufigkeit der verpassten Alarme in % (TTA 6 s)	Anzahl dynamischer Falschalarme (TTA 6 s)	Häufigkeit der Falschalarme in % (TTA 6 s)
1	55,6	29919	8288	46	7	15,2	36	43,9
2	70,1	28754	6159	47	9	19,2	39	45,3
3	86,6	26581	1536	13	2	15,4	0	62,5
4	71,6	27520	3958	27	0	0	45	69,2
5	73,8	30319	3421	20	2	10	45	54,1
6	70,8	29919	5019	39	10	25,6	46	46,2
7	91,7	29424	1793	14	6	42,8	12	56,7
8	90,7	28802	1427	13	3	23,1	17	60
9	93,9	27584	537	8	1	12,5	12	47,9
10	84,6	29372	3082	25	7	28	23	69,6
11	79,2	27877	2724	17	6	35,3	39	66,7
12	83,2	26904	2059	12	1	8,3	24	49,1
13	82,3	28937	3421	28	7	25	27	55,8
14	85,2	29659	2117	19	1	5,26	24	62,5
15	91,5	33061	1153	9	1	11,1	15	27,3
16	94,2	15249	544	8	4	50	3	67,5
Mittel	81,6	28118	2952,4	21,6	4,2	20,4	25,4	55,3

8.3.5 Auswertung der Überlebensfähigkeit

Die Überlebensfähigkeit ist ein Wahrscheinlichkeitsmaß, das in Form der relativen Häufigkeit dargestellt wird. Die Überlebensfähigkeit ist dann gewährleistet, wenn ein Prüfgegenstand die geforderten Genauigkeiten für ein bestimmtes Manöver, einen Prüffall oder ein Prüfszenario einhalten kann. Dabei führen sowohl richtige als auch falsche Alarme zu einem Abbruch der Überlebensfähigkeit. In dieser Arbeit wird als Manöver die Bereitstellung integrierter Ortsdaten für die einzelnen Prüffälle abgebildet. In Tabelle 8-8 sind die Vergleichsfahrten mit dem Überlebensverhalten dargestellt und die relative Überlebensrate für den Prüffall bestimmt.

Tabelle 8-8: Überlebensraten für die Vergleichsfahrten der Prüffälle Autobahnfahrt, Überlandfahrt und Stadtfahrt

Prüffall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Überlebensrate
Autobahnfahrt	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	62,5 %
Überlandfahrt	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	56,25 %
Stadtfahrt	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	62,5 %

Die Häufigkeitsverteilungsfunktion der Überlebensfähigkeit ist abhängig von der Forderung der Aufrechterhaltung der spezifizierten Anforderungen (Alarmgrenze 5 m). Abbildung 8-15 stellt die relative Häufigkeitsverteilung der Überlebensfähigkeit für alle Prüffälle und Messfahrten dar. Aus Gründen der

Übersichtlichkeit endet die Abszisse bei 300 s. In sehr wenigen Fällen lag die Überlebensdauer über diesem Zeitraum. Die maximale Überlebensdauer während einer der Vergleichsfahrten ist mit 20 min und 12 s weit außerhalb der Darstellung. Dennoch zeigt sie eindeutig, dass die andauernde Überlebensfähigkeit eines Systems ohne korrekten oder falschen Alarm nicht für automatisierte Fahrfunktionen geeignet ist. Schon bei einer Anforderung an die Überlebensfähigkeit von 50 s (250 Messwerte bei $f = 5$ Hz) wird diese in nicht mal zehn Prozent der Fälle erreicht.

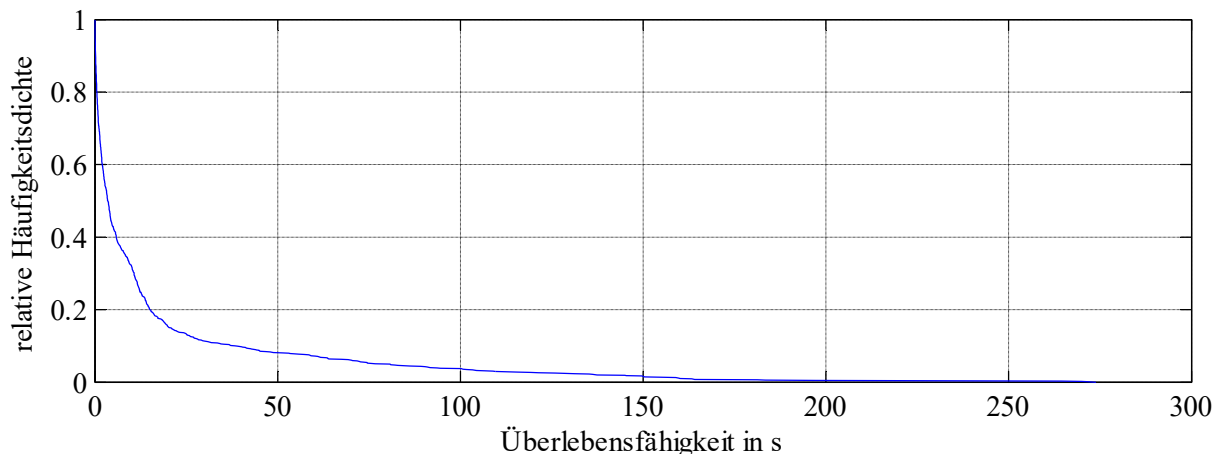


Abbildung 8-15: Überlebensfähigkeit der Vergleichsfahrten über alle Fahrten und das gesamte Prüf-szenario

8.3.6 Auswertung der Verfügbarkeit

Die Auswertung der Verfügbarkeit des GNSS-Empfängers bezieht die relative Häufigkeit, mit der zu einem beliebigen Zeitpunkt in dem spezifizierten Anwendungsgebiet der GNSS-Empfänger Ortungsinformationen bereitstellt, die den Anforderungen genügen. Sowohl die Messumgebung als auch die Qualität des GNSS-Empfängers beeinflussen die Verfügbarkeit. Im Vergleich zur Integritätsverfügbarkeit, wo die verfügbaren Integritätswerte in das Verhältnis zu der Anzahl der bereitgestellten Ortsinformationen gesetzt werden, wird bei der Bestimmung der Punktverfügbarkeit die Anzahl der Messwerte mit einer verfügbaren Integritätsangabe ins Verhältnis zu den gesamtmöglichen Messwerten gesetzt.

Da in dieser Arbeit ein hochsensitiver GNSS-Empfänger als Prüfgegenstand ausgewählt wurde, der stets Ortungsinformationen bereitstellt und lediglich die Protektionsgrenze unter schwierigen Messbedingungen vergrößert (bis hin zu mehreren Kilometern), besitzen die möglichen Werte und die verfügbaren Werte fast immer die gleiche Anzahl. Somit sind die relativen Häufigkeiten der Punktverfügbarkeit ähnlich den relativen Häufigkeiten der Integritätsverfügbarkeit mit der möglichen Alarmgrenze von 0,2 s.

Tabelle 8-9: Relative Häufigkeiten der Punktverfügbarkeiten mit den Integritätsbedingungen TTA = 6 s und AG = 5 m für die Vergleichsfahrten

Prüffall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
Autobahnfahrt in %	NaN	96	97	92	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	NaN	100	98,7
Überlandfahrt in %	92	99	96	93	100	100	100	100	96	100	96	100	100	100	87	100	97,4
Stadtfahrt in %	91	100	87	100	100	100	95	100	100	89	100	100	100	100	88	100	96,9

8.3.7 Auswertung der Ortungslatenz

Während früherer Labortests wurde die Ortungslatenz im Detail untersucht (siehe [Spiegel/Becker 2015]). Dabei hat sich gezeigt, dass die Anzahl und die Wahl der Datenschnittstellen einen erheblichen Einfluss auf die Ortungslatenz besitzen. Für diesen Fall wurden die Prüfgegenstände über eine RS232 Schnittstelle mit dem Echtzeitsystem und zusätzlich via USB-Schnittstelle mit einem Prüflaptop verbunden. Bei beiden Empfängern wurden die Messungen in der Software der Empfängerhersteller dargestellt.

In Abbildung 8-16 sind die Ortungslatenzen für den Prüfgegenstand und einen GNSS-Empfänger höchster Qualität in Histogrammform dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der GNSS-Empfänger höchster Qualität hinsichtlich der Ortungsinformationen eine deutlich geringere Latenz aufweist als der Prüfgegenstand. Zusätzlich weist der Empfänger höchster Qualität eine deutlich geringere Streuung auf.

Die Ortungslatenzen des Automotive-GNSS-Empfängers besitzen einen Median von 100 ms und die Perzentile 2,5 % und 97,5 % liegen bei 81 ms und 124 ms. Der Median des Empfängers höchster Qualität liegt bei 31 ms mit den Perzentilen 2,5 % und 97,5 % bei 22 ms und 41 ms. Wird die USB-Ausgabe bei dem Automotive-GNSS-Empfänger deaktiviert, reduziert sich der Median der Ortungslatenz auf ca. 70 ms bei gleichbleibender Streuung. Der GNSS-Empfänger höchster Qualität weist keine messbare Veränderung bei der Schnittstellenvariation auf.

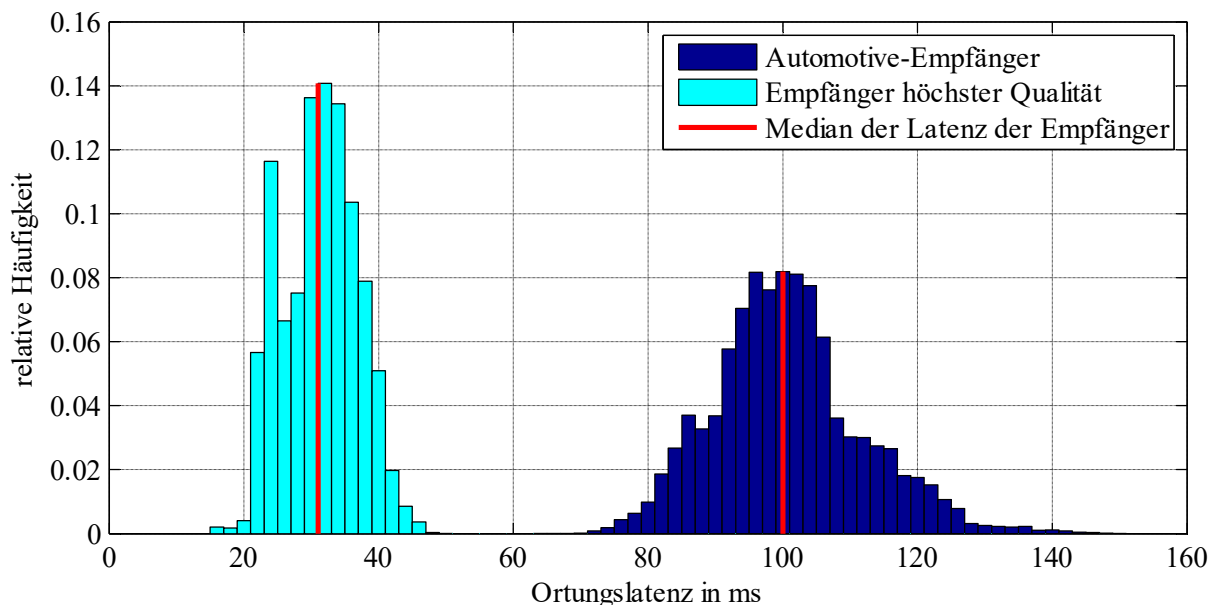


Abbildung 8-16: Ortungslatenz des Prüfgegenstands und eines High-End-GNSS-Empfängers (Datengrundlage ca. 500.000 Messwerte)

Es ist nicht verwunderlich, dass mit zunehmender Anzahl von verfolgten Satelliten die Latenz der einzelnen Empfänger weiter ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Berechnung des Orts mit der

Anzahl der getrackten und genutzten Satelliten rechenaufwändiger wird. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Messumgebung auf die Latenz sind in [Spiegel/Becker 2015] dargestellt.

8.3.8 Auswertung der Ortsgenauigkeit unter Berücksichtigung der Ortungslatenzverzerrung

Wird die Ortungslatenz berücksichtigt, bewegt sich der Prüfräger während des Zeitpunkts der Messung bis zur Bereitstellung der Information in Abhängigkeit der Geschwindigkeit weiter. Dies erweitert die Messabweichung um einen dynamischen Anteil, der meist mit einem Anstieg der Messabweichung einhergeht. In Abbildung 8-17 ist eine Messfahrt dargestellt mit der horizontalen Ortsrichtigkeit ohne Berücksichtigung der Ortungslatenz (Messwerte werden ohne Zeitverzögerung bereitgestellt) und mit Berücksichtigung der Ortungslatenz (Messwerte werden mit Zeitverzögerung bereitgestellt). Dabei zeigte sich wie erwartet, dass die Latenzzeit bei zunehmender Geschwindigkeit einen höheren Einfluss auf die Ortsabweichung hat. Folglich besitzt die Ortungslatenz einen großen Einfluss in Szenarien mit erhöhten schnellen Fahranteilen.

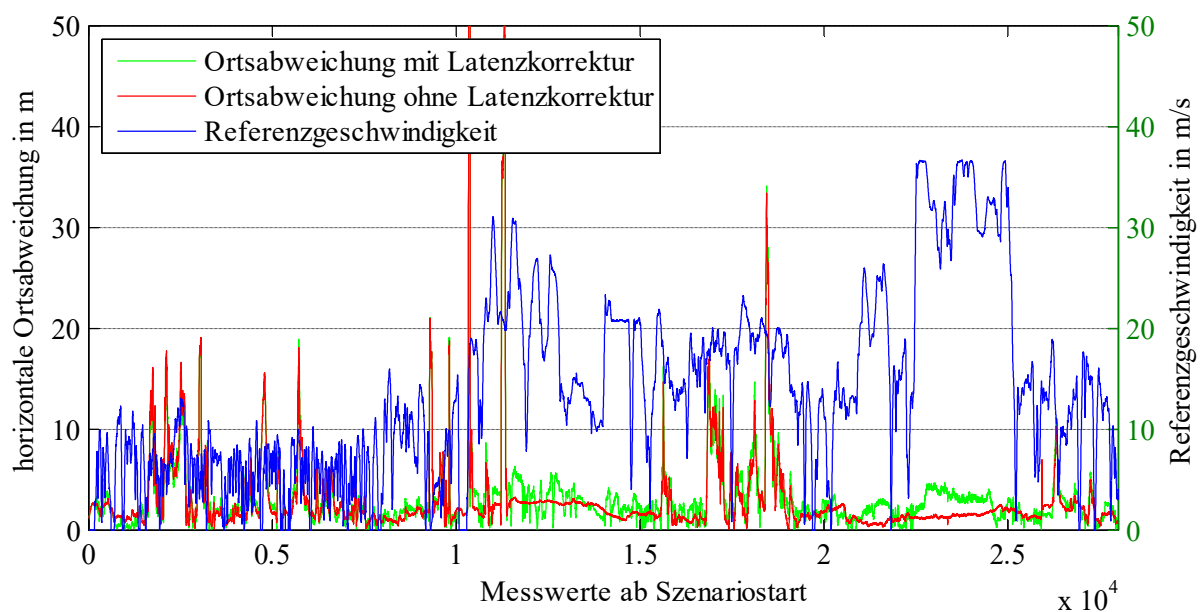


Abbildung 8-17: Horizontale Ortsabweichung mit und ohne Ortungslatenzverzerrung über ein gesamtes Prüfzenario

Der Einfluss der Ortungslatenz wird deutlich, wenn die horizontale Ortsabweichung mit und ohne Berücksichtigung der Ortungslatenz in Form von Summenhäufigkeitsverteilungen dargestellt wird, siehe Abbildung 8-18. Bedingt durch die Ortungslatenz steigt die horizontale Ortsabweichung im Median von 1,49 Meter auf bis zu 3,02 m und für das 95. Perzentil von 2,25 Meter auf 4,25 Meter an. Im Bereich von Ortsabweichungen über 4,5 m ist der Einfluss jedoch vernachlässigbar gering.

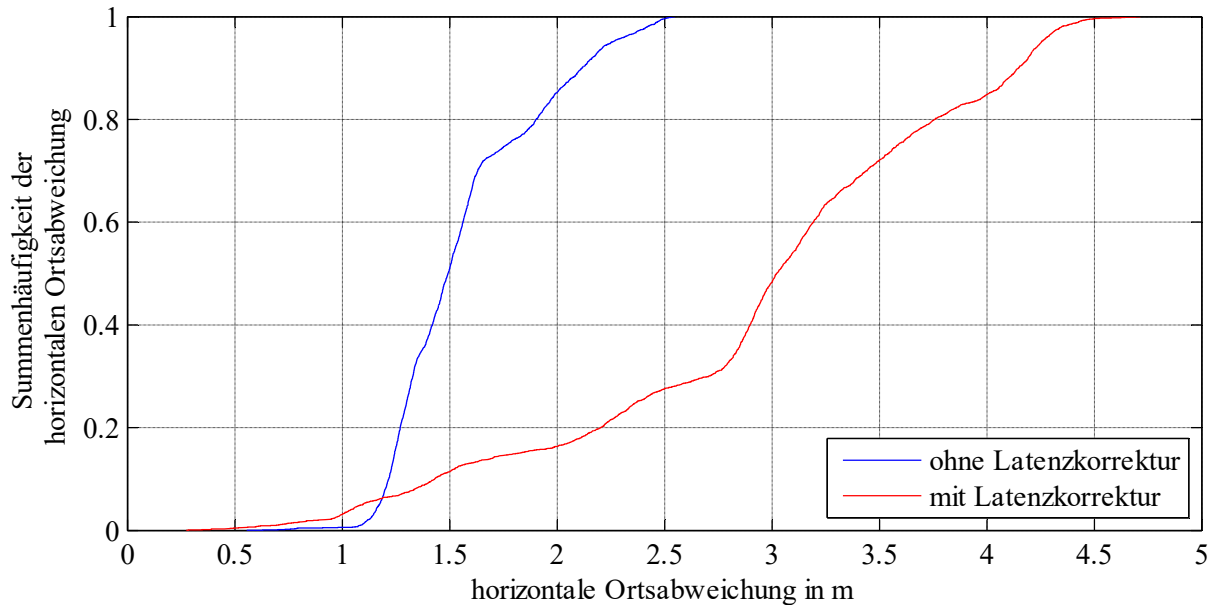


Abbildung 8-18: Horizontale Ortsabweichungen mit und ohne Ortungslatenzverzerrung der Messfahrt 13 für den Prüffall Autobahn (Datengrundlage ca. 2718 Messwerte) des Prüfgegenstands

8.4 Quantifizierung der Messbedingungen

Für die Bestimmung des Einflusses der Messbedingungen auf das Messergebnis wird auf das in Kapitel 7 eingeführte Werkzeug zur Bestimmung des bmO zurückgegriffen. Als Basis des Werkzeugs wurde während der Prüffahrten mit dem Referenzmesssystem eine Referenztrajektorie aufgenommen. Diese besteht aus den Referenzorten und einer Information über die Messunsicherheit. Zur Bestimmung des bmO wird der Größenwert der einzelnen Einflüsse benötigt. Die Herkunft der Daten, die Genauigkeit der implementierten Algorithmen und die zeitliche Auflösung sind in Kapitel 7 dargestellt. Die GPS-Navigationsnachrichten und die Korrekturdaten des EGNOS wurden für diese Arbeit von den Datenservern der jeweiligen Organisation heruntergeladen. Ebenso hätten die Nachrichten über den Empfänger aufgezeichnet werden können. Die Genauigkeit und die Unsicherheit wurden aus den in Unterkapitel 3.11 dargestellten Werten entnommen. Im Gegensatz zu den in Unterkapitel 3.6 dargestellten Verfahren zur Bestimmung der Uhrenabweichungen wurde in dieser Arbeit auf die IGS-Beobachtungsdaten im 30 Sekundentakt zurückgegriffen. Um dennoch ein gutes Filterverhalten zu erlangen, wurden die RINEX-Daten über 10 Messwerte, also 5 min, geglättet. Die Resultate für die bmO-Abweichungen sowie für die Unsicherheiten für den Prüffall Autobahn sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

8.4.1 Messbedingungen während der Prüffahrt

Der bmO wurde im Kontext dieser Arbeit für den Prüffall Autobahnfahrt bestimmt. Dieser wurde ausgewählt, da für diesen Fall die Abwesenheit von Mehrwegeeffekten am wahrscheinlichsten ist. Mehrwegeinterferenzen durch Reflexionen an dem Fahrzeugdach lassen sich nicht vermeiden und werden als grundsätzliches Rauschen mit in die Empfängerqualität einberechnet. In Abbildung 8-19 und Abbildung 8-20 sind die bmO-Abweichungen in Nord- und Ost-Richtung über die Messepochen ab Start des

Prüffalls aufgetragen. Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Abweichungen des bmO jeweils im mittleren bis unteren Bereich der Abweichungen der Wiederholfahrten liegen. Am Beginn der Prüffahrt stimmt die Abweichung des bmO mit denen der meisten Wiederholfahrten überein. Über den Prüffall bleibt die Abweichung des bmO relativ konstant. Vereinzelt Sprünge bei den bmOs (bei ca. 400 und 3200 Epochen) sind auf den An- bzw. Abstieg eines Satelliten über bzw. unter die Elevationsgrenze zurückzuführen. Generell weist der bestmögliche Ort eine systematische Abweichung im Bereich von 1m bis 1,5 m auf. Zurückzuführen ist dies auf den Einfluss der Ionosphäre und Troposphäre.

Des Weiteren sind bei einer Wiederholfahrt zwei Ausreißer zu beobachten, die sowohl in Nord- als auch in Ost-Richtung ausgeprägt sind, wobei sich die Vorzeichen für die Ostabweichung zwischen den Ausreißern umkehren. Worauf diese zurückzuführen sind, ist nicht eindeutig. Möglicherweise sind diese auf Abweichungen in den aufgezeichneten Daten des Transientenrekorders zurückzuführen. Das Signal-zu-Rausch-Verhalten weist zu den Zeitpunkten keine Änderungen auf, was den Einfluss von Mehrwegeeffekte nahezu ausschließt.

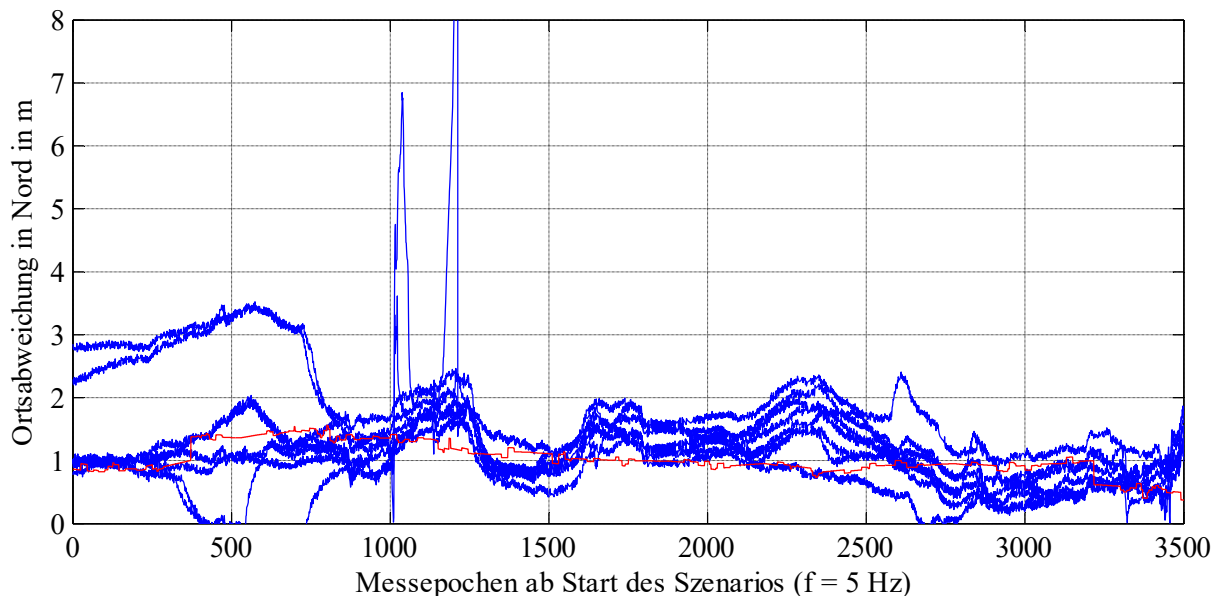


Abbildung 8-19: Bestmögliche Ortsabweichung in Nord (rot) und bei Wiederholfahrten (blau) für das Szenario „Autobahn“

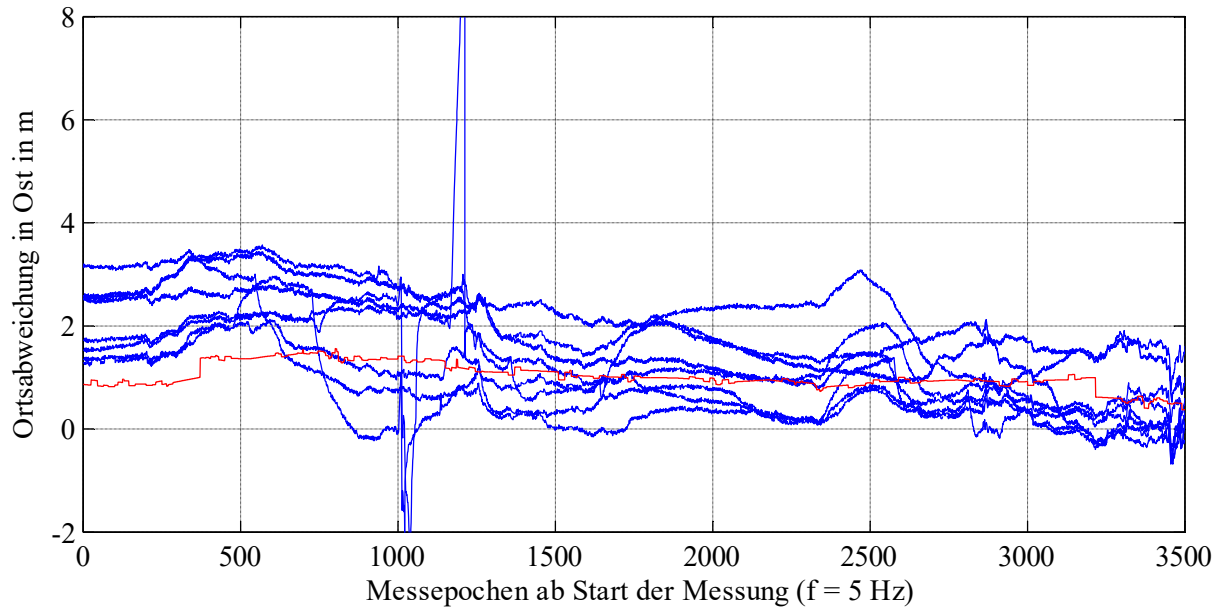


Abbildung 8-20: Bestmögliche Ortsabweichung in Ost (rot) und bei Wiederholfahrten (blau) für den Prüffall „Autobahn“

Um zusätzliche Informationen zu gewinnen, werden die Wertepaare der Ortsabweichungen in Nord und Ost und der bmO-Abweichungen in einem Streudiagramm aufgetragen. Dabei ist der Hauptanteil der bmOs im Zentrum der ermittelten GNSS-Messungen angesiedelt. Die bmO-Abweichungen können in zwei Punktwolken aufgeteilt werden. Neben dem dominierenden Anteil um die Abweichung (ca. 1 m Ost und ca. 0,75 m Nord) ist die zweite Anhäufung von kleiner Anzahl. Diese Anhäufung ist dem Anfangs- und Endbereich geschuldet, in denen ein zusätzlicher Satellit zur Verfügung stand, dessen ionosphärischer Einfluss jedoch nicht durch die Korrekturdaten des EGNOS bereitgestellt werden konnte, da keine ausreichende Anzahl an ionosphärischen Netzknoten zur Verfügung stand.

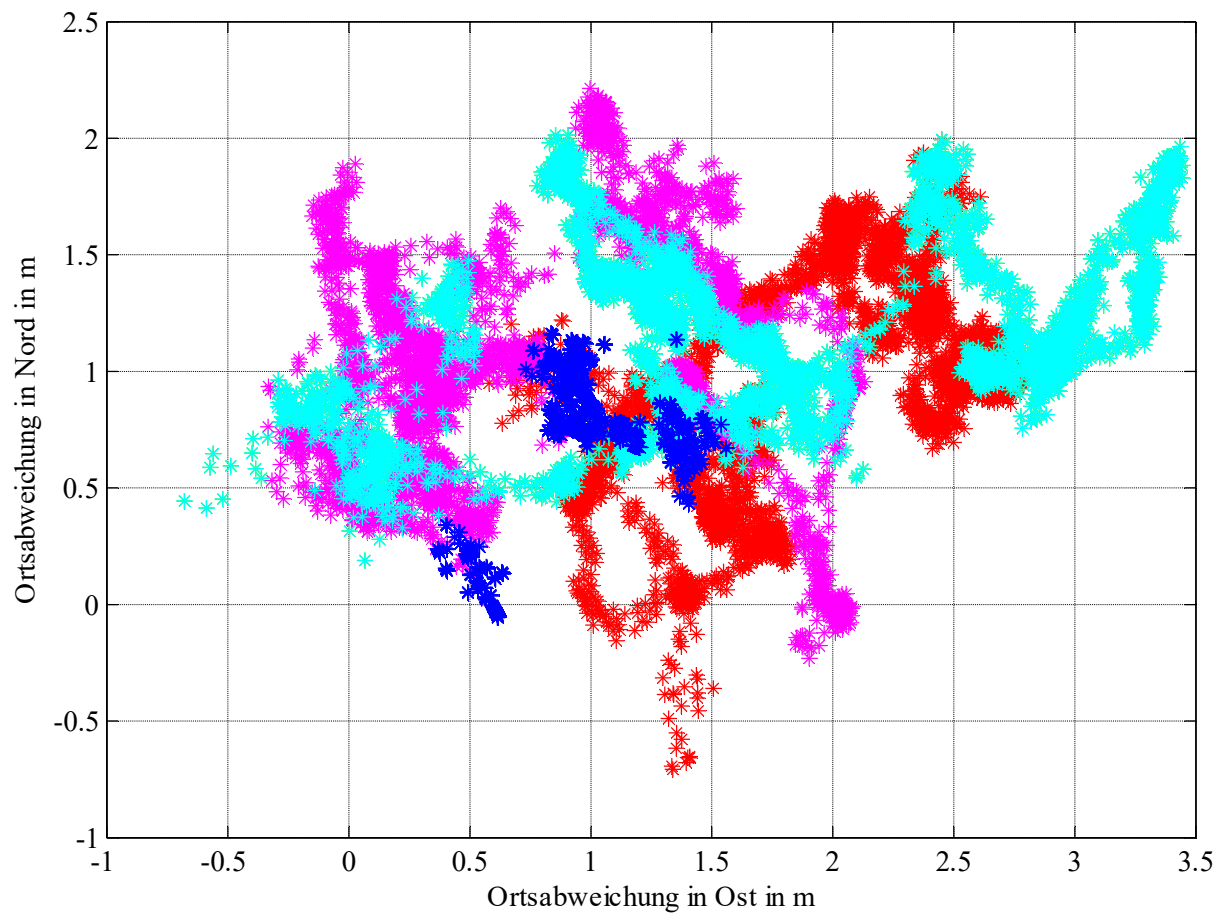


Abbildung 8-21: Streudiagramm des bestmöglichen Orts (dunkelblau), der real gemessenen Abweichungen (rot) und zweier zufällig ausgewählter Wiederholfahrten (weitere Farben) für den Prüffall Autobahnfahrt.

Die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Ortsabweichungen der Wiederholfahrten und die bestimmten bmO-Abweichungen sind in Abbildung 8-22 dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass in den Grenzbereichen die Ortsabweichungen in Ost der Wiederholfahrten deutlich stärker streuen als die Ortsabweichungen der bmOs.

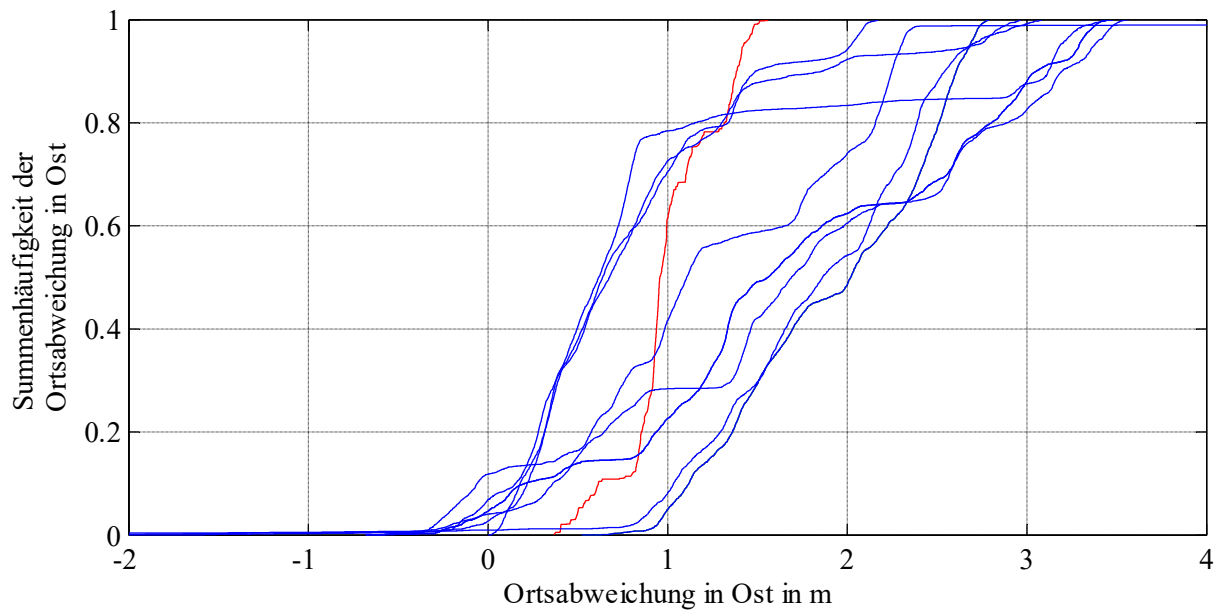


Abbildung 8-22: Summenhäufigkeitsverteilungen der Ortsabweichungen der Wiederholfahrten in Ost (blau) und der bestmöglichen Orte (rot)

Die Summenhäufigkeitsverteilungen der Ortsabweichungen in Nord weisen ein ähnliches Verhalten auf, weshalb an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung verzichtet wurde.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die Messbedingungen während der Messfahrt 13 für den Prüffall Autobahn. Da die Chi-Quadrat-Statistik und weitere Verteilungstests fehlgeschlagen sind, werden die Messbedingungen durch die bmO-Abweichung in den Dimensionen Nord und Ost in der Form von Perzentilen und dem Median ausgedrückt.

Tabelle 8-10: Einfluss der Messbedingungen während der Messfahrt

bmO-Abweichungen	5. Perzentil in m	Median in m	95. Perzentil in m
Ost	0,50	1,00	1,42
Nord	-0,13	0,77	1.09

Die in der Produktspezifikation des Herstellers angegebene Genauigkeit mit 2,0 m CEP50 kann ausgehend vom Koordinatenursprung für die Genauigkeit (siehe Unterkapitel 8.3.1) nicht bestätigt werden. Wird jedoch das Zentrum der bmOs als Koordinatenzentrum für den Abweichungskreis gewählt, kann erkannt werden, dass die Genauigkeitsangabe unter Berücksichtigung der Messbedingungen für die Messfahrt eingehalten werden kann. Wenn die Messbedingungen annähernd einer Normalverteilung folgen, kann diesem Empfänger die in der Produktspezifikation dargestellte Genauigkeit für die dargelegten Prüffälle bestätigt werden.

8.4.2 Messunsicherheit bei der Bestimmung des bestmöglichen Orts

Die Messunsicherheit des bestmöglichen Orts wurde auf Basis der in Abschnitt 3.11 dargestellten Messunsicherheiten der unterschiedlichen Einflüsse bestimmt. Dabei zeigt sich, dass, bedingt durch die

Satellitenkonstellation und andere Einflüsse, eine systematische Abweichung des bmO sowohl in Nord als auch in Ost vorhanden ist. Die ermittelten bmOs müssen durch Aufsummieren um systematische Abweichungen aus der Messunsicherheitsanalyse korrigiert werden. Die ermittelte Messunsicherheit weist eine Ellipsenform auf (siehe Abbildung 7-6 für einen Messwert). Die Messunsicherheiten für den Prüffall Autobahn sind in Abbildung 8-23 dargestellt.

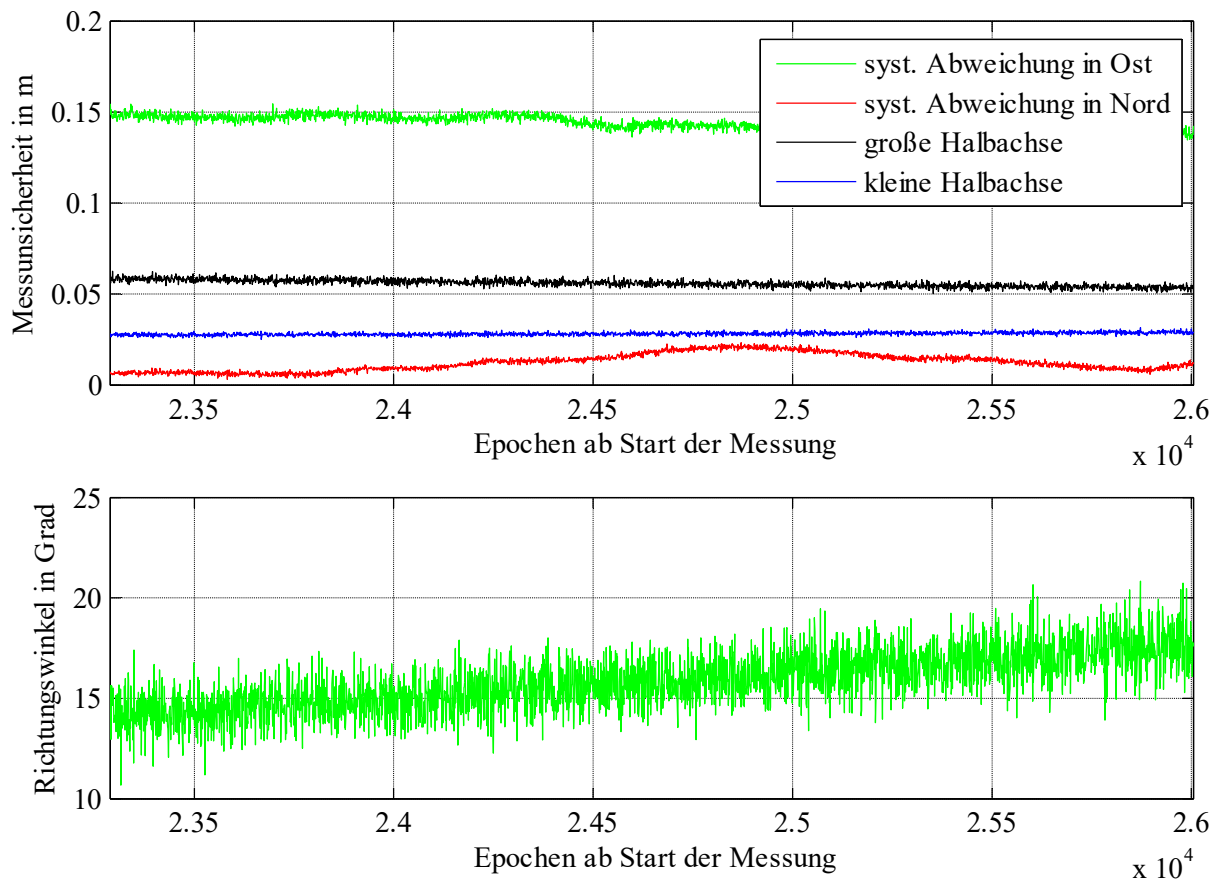


Abbildung 8-23: Komponenten der Messunsicherheit für den bestmöglichen Ort mit den systematischen Abweichungen in Ost und Nord und den maximalen und minimalen Abweichungen der Unsicherheitsellipse für eine Wahrscheinlichkeit von 68%.

Aus den Abbildungen geht hervor, dass eine systematische Messabweichung in Ost im Bereich von 15 cm und in Nord von wenigen cm vorliegt. Interessanterweise schwankt die systematische Abweichung in Nord deutlich stärker als in Ost. Die systematischen Messabweichungen müssen auf die berechneten bmO-Abweichungen aus Tabelle 8-10 aufsummiert werden (dargestellt in Tabelle 8-11). Dieses führt dazu, dass die bmO-Trajektorien sowohl in Nord- als auch in Ostrichtung verschoben werden und sich den Messtrajektorien annähern. Die große und kleine Halbachse der Messunsicherheitsellipse sind relativ stabil und für die Wahrscheinlichkeit von 68 % im Bereich von wenigen cm. Der Richtungswinkel der Messunsicherheitsellipse dreht sich während der Durchfahrt des Prüffalls von ca. 14° auf ca. 17°

(siehe Abbildung 8-23). Dies ist ein typisches Verhalten durch die Veränderung der Messbedingungen und infolge der Satellitenkonstellation.

8.5 Verhalten der horizontalen Genauigkeit der Vergleichs- und Wiederholfahrten

Die Festlegung der genauen Anzahl an erforderlichen Vergleichsfahrten erfordert die Kenntnis über die Grundgesamtheit. In dem Standard STANAG 4278 wird die Anzahl von Messungen grafisch dargestellt. Das Konfidenzintervall wird dort, in Abhängigkeit von der als wahr angenommenen Genauigkeit (20 % der Abweichung) für zwei Dimensionen und eine 95 %ige Wahrscheinlichkeit für korrelierte Messungen bei 18 Messwiederholungen und bei nicht korrelierten Messungen bei 37 Messwiederholungen erreicht. Dabei wird von einer repräsentativen Stichprobe der Grundgesamtheit ausgegangen. [vgl. STANAG 4278]. Die Grundgesamtheit wird für die horizontalen Ortsabweichungen der Messungen durch theoretische Verteilungen der Rayleigh oder Lognormalverteilung durch Hypothesentests nicht bestätigt.

Die Aussagekraft einer Messung oder eines Größenwerts wird in Form eines Konfidenzintervalls angegeben. Die Breite des Konfidenzintervalls für Normal- und studentsche t-Verteilungen ist abhängig vom erlaubten absoluten Fehler der Streuung im Zähler und der Quadratwurzel des Stichprobenumfangs im Nenner.

Durch Erhöhung der Stichprobenzahl wird somit das Konfidenzintervall kleiner und jede größere Abweichung verliert an Einfluss. Dies soll Anhand der Abbildung 8-24 dargestellt werden. Es ist jeweils das 95. Perzentil aus den zusammengefassten Messfahrten dargestellt (Vergrößerung der Stichprobe um jeweils eine Fahrt). Das 95. Perzentil wird für die Anzahl eins der zusammengefassten Fahrten aus der ersten Fahrt gebildet. Für die Anzahl zwei wird das 95. Perzentil aus den ersten beiden Messfahrten gebildet usw. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Prüffälle mit geringen erdnahen Einflüssen in einem Bereich von 2,2 m der horizontalen Genauigkeit einschwingen und nur sehr geringe Änderungen mit Erhöhung der Anzahl der zusammengefassten Prüffahrten aufweisen. Messfahrten mit höheren Auftretswahrscheinlichkeiten von erdnahen Einflüssen weisen hingegen starke Veränderungen auf, die sichtbar auf einen Größenwert konvergieren. Aus der Abbildung lässt sich durch die geringen Varianzen der zusammengefassten Messfahrten schließen, dass für die Prüffälle Autobahnfahrt und Überlandfahrt und möglicherweise Stadtfahrt eine ausreichend große Stichprobe vorhanden ist. Der Einfluss von Vergleichsfahrten mit großen Streuungen wird durch die zunehmende Anzahl von Messwerten kompensiert. So liegt das 95. Perzentil der Messfahrt 11 für den Prüffall Autobahn bei 4,8 m. Der Einfluss wird dabei von der Gesamtanzahl der aufsummierten Messwerte für den Prüffall auf $2494/23467 = 10,6 \%$ minimiert.

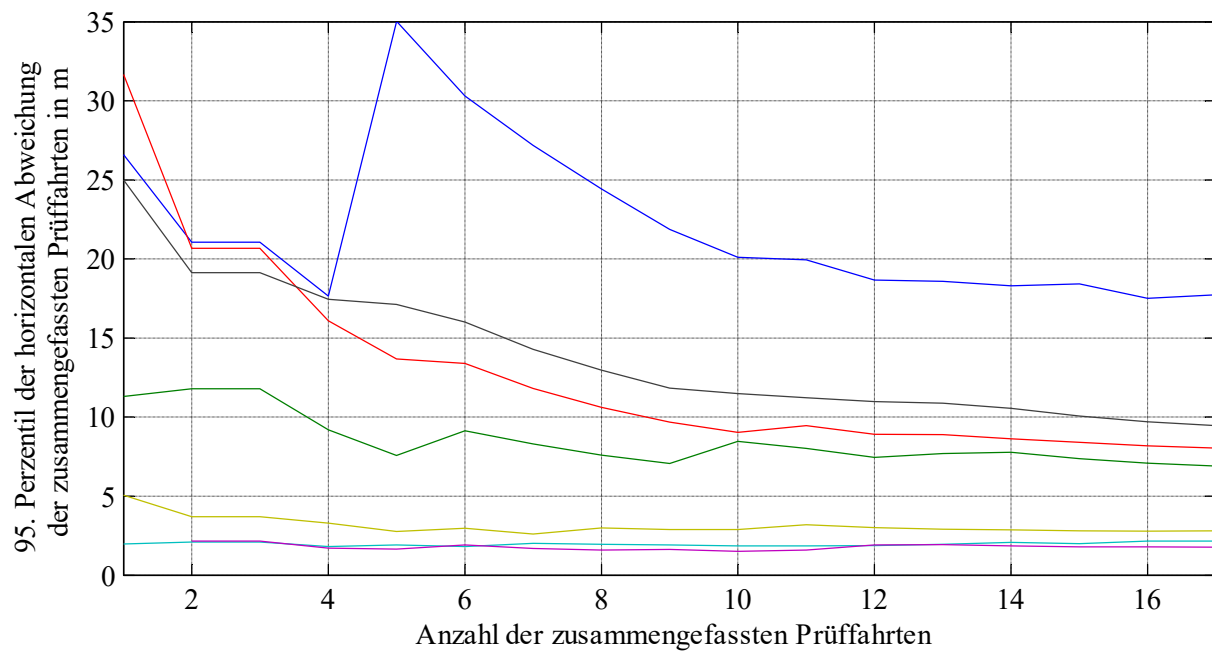


Abbildung 8-24: 95. Perzentil der zusammengefassten Prüffahrten für ausgewählte Prüffälle (blau = Großstadt mit Begrünung, schwarz = gesamte Fahrt, rot = Großstadt ohne Begrünung, grün = Großstadt mit etwas Begrünung, beige = Stadtfahrt, violett = Autobahnfahrt, hellblau = Überlandfahrt)

Durch die zurückgewiesenen Hypothesentests ist die Bestimmung einer Verteilung der Grundgesamtheit nur mit großer Unsicherheit zu schätzen. Aus diesem Grund wird auf die Bestimmung eines Konfidenzintervalls nach Bickel und Freedman auf der Basis des Bootstrap-Verfahrens von Efron zurückgegriffen. Dabei wird auf Basis der erhobenen Messdaten zufällig eine endliche Zahl an Messwerten aus der Stichprobe der erhobenen Messdaten mit zurücklegen gezogen und das 95. Perzentil bestimmt. Die Verteilung der einzelnen 95. Perzentile gibt im Anschluss Information über die Streuung bekannt. Aus der Streuung kann ein Konfidenzintervall für eine bestimmte Wahrscheinlichkeit bestimmt werden. [vgl. Efron 1977; Bickel/Freedman 1981].

Das Verfahren ist wissenschaftlich diskutabel, basiert es doch auf der Annahme, dass die Stichprobe aus der die Zufallszahlen gezogen werden, repräsentativ für die Grundgesamtheit ist. Ist dies der Fall, bietet das Verfahren sinnvolle Ergebnisse [vgl. O'Hagan/Stevens 2003].

Die Konfidenzintervallgrenzen für das 95. Perzentil, berechnet nach dem Bootstrap Verfahren, sind in Tabelle 8-11 dargestellt. Die Anzahl der Berechnungen wurde auf Basis von Gleichung 6-16 konservativ festgelegt. Somit wurden, um eine gewünschte Wahrscheinlichkeit von 95 % zu erlangen, insgesamt 50000 Replikationen durchgeführt. Im Anschluss wurde aus den 95. Perzentilen (Normalverteilung liegt vor) der Konfidenzbereich für eine 95 %ige Wahrscheinlichkeit bestimmt. Die dargestellten Zahlen geben einen Ausblick über das Vertrauen in die Messergebnisse. Würde beispielsweise ein weiteres Prüfergebnis für den Prüffall Autobahn mit einem 95. Perzentil von 4,8 m auftreten, würde der neue Schätzwert der zusammengefassten Fahrten 2,55 Meter betragen und wäre damit außerhalb der Konfidenzintervallgrenzen, die jedoch nur 95% der Messwerte umfassen.

Tabelle 8-11: Konfidenzintervallgrenzen bei der Bestimmung des 95. Perzentiles

	Autobahn in m	Überlandfahrt in m	Stadtfahrt in m
Obere Konfidenzintervallgrenze (95% Wahrscheinlichkeit)	2,37	2,72	3,56
Schätzwert	2,31	2,71	3,48
Untere Konfidenzintervallgrenze (95% Wahrscheinlichkeit)	2,26	2,69	3,41

8.6 Korrelation der Wiederholmessungen mit der realen Messfahrt

Als weitere Untersuchung wurde die Korrelation zwischen den einzelnen Wiederholfahrten und der realen Messfahrt bestimmt. Damit sollen die Fragen beantwortet werden, ob der Transientenrekorder die Messungen beeinflusst und ob die Annahme der nur gering vorhandenen bodennahen Einflüsse für die Prüffälle Autobahnfahrt und Überlandfahrt korrekt ist. Eine hohe Korrelation ($> 0,9$ oder $< -0,9$) bedeutet, dass eine Relation besteht. Die Korrelationskoeffizienten können folglich im Kontext der Wiederholmessungen interpretiert werden:

- Im Kontext der Wiederholmessungen bedeutet eine starke Korrelation, dass systematische Einflüsse vorliegen. Diese können auf die Messbedingungen oder den Einfluss des Transientenrekorders zurückgeführt werden.
- Ein geringer Korrelationskoeffizient im Bereich von 0,2 bis -0,2, deutet auf keine bis eine sehr schwache Korrelation hin. Es ist zu erwarten, dass bei einem sehr genauen Transientenrekorder die Korrelation der Wiederholfahrten in Umgebungen ohne systematische Einflüsse gering ist.
- Ein hoher negativer Korrelationskoeffizient $< -0,9$ deutet auf eine ausgeprägte negative Korrelation hin. Diese könnte für kurze Prüffälle bei sehr komplexen Messbedingungen auftreten, wenn Mehrwegeeffekte oder Abschattung viel Interpretationsspielraum für den Prüfgegenstand ermöglichen.

In Tabelle 8-12 sind die Korrelationskoeffizienten für die Querabweichung der einzelnen Wiederholfahrten, der realen Messfahrt, für die einzelnen Prüffälle und die gesamte Fahrt dargestellt. Dabei kann für die drei in der Auswertung dargestellten Prüfzenarien eine hohe Korrelation mit der realen Messfahrt identifiziert werden. Lediglich die Prüffälle mit komplexeren Messbedingungen z. B. Großstadt mit Begrünung, Autobahndurchfahrt 1 und 2 sowie die Überlandfahrt 2 weisen hohe Varianzen auf. Interessanterweise sind jegliche Korrelationskoeffizienten positiv. Daraus lässt sich schließen, dass die systematischen Einflüsse das Rauschen und die folgende Streuung des GNSS-Empfängers überlagern.

Tabelle 8-12: Korrelationskoeffizient zwischen der Quergenauigkeit der Wiederholfahrten und der realen Messfahrt

Szenario	Korrelationskoeffizient zwischen den Wiederholmessungen und der realen Fahrt 13									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Großstadt mit Begrünung	0,79	0,80	0,61	0,79	0,71	0,90	0,71	0,80	0,65	0,73
Großstadt etwas Begrünung	0,77	0,90	0,88	0,77	0,88	0,92	0,68	0,91	0,76	0,89
Großstadt keine Begrünung	0,89	0,95	0,96	0,89	0,94	0,84	0,93	0,88	0,96	0,96
Brücken Schwimmbad	0,73	0,56	0,81	0,73	0,59	0,90	0,72	0,64	0,67	0,72
Brücken Eisenbahn	0,86	0,99	0,68	0,86	0,79	0,52	0,94	0,95	0,64	0,54
Autobahndurchfahrt	0,71	0,73	0,85	0,71	0,74	0,83	0,76	0,75	0,19	NaN
Autobahndurchfahrt 2	0,79	0,70	0,87	0,79	0,82	0,91	0,76	0,79	0,89	0,76
Überlandfahrt	0,94	0,78	0,85	0,94	0,74	0,92	0,84	0,83	0,80	0,91
Waldfahrt	0,88	0,95	0,95	0,88	0,95	0,94	0,88	0,95	0,89	0,94
Autobahnfahrt	0,85	0,90	0,87	0,85	0,87	0,76	0,75	0,86	0,85	0,83
Stadt 1	0,89	0,92	0,81	0,89	0,93	0,81	0,66	0,79	0,93	0,81
Stadt 2	0,92	0,91	0,84	0,92	0,84	0,89	0,87	0,89	0,90	0,83
Überlandfahrt 2	0,54	0,84	0,89	0,54	0,84	0,50	0,84	0,38	0,87	0,77
Gesamte Fahrt	0,87	0,80	0,87	0,87	0,88	0,91	0,84	0,89	0,87	0,87

8.7 Fazit und Darstellung des vollständigen Messresultats

Das vollständige normkonforme Messresultat für die Messfahrt 13 ist in Tabelle 8-13 dargestellt. Die Messfahrt wurde ausgewählt, da sie die einzige Fahrt ist, bei der ausreichend Wiederholabspielungen mit dem Transientenrekorder durchgeführt werden konnten und somit ein größeres Vertrauen in die Qualitätsmerkmale der Wiederholgenauigkeit und der bestmöglichen Ortsabweichung vorliegt. Zusätzlich gehören zu einer normkonformen Messresultatdarstellung eine Angabe über die Messunsicherheit der einzelnen Eingangsgrößen für die Messunsicherheitsanalyse und den Überlagerungsfaktor. An dieser Stelle wird auf Tabelle 3-7 verwiesen.

Die folgende Darstellung ist nicht vergleichbar mit einem normkonformen Prüfbericht. Dieser enthält eine Menge zusätzlicher Informationen, wie z.B. zum Prüflingenieur, dem Prüfaufbau, der Prüftrajektorie.

Tabelle 8-13: Darstellung des vollständigen Messergebnisses für den Prüffall Autobahnfahrt

Qualitätseigenschaften/-merkmale	Größe	Vergleichsmessungen	Messunsicherheit und Messbedingungen
Ortsgenauigkeit (horizontal)	Median	1,5 m	Messunsicherheit der Referenz: 0,04 m 95 % basierend auf einer Normalverteilung bmO-Abweichung horizontal: Median: 1,37 m 95 %: 1,58 m Nord: Median: 0,79 m 5 %: -0,10 m 95 %: 1,12 m Ost: Median: 1,14 m 5 %: 0,54 m 95 %: 1,56 m Messunsicherheit der bmO-Abweichung: max. große Halbachse: 0,12 m (95%) max. kleine Halbachse: 0,07 m (95%)
	95. Perzentil	2,3 m	
Ortungslatenzfunktion	Median	100,0 ms	
Ortungslatenzverzerrungsfunktion (horizontal)	Median	2,3 m	
	95. Perzentil	4,3 m	
Integritätsfunktion/ Dynamische Verfügbarkeit	Relative Häufigkeit	82,3 %	Nord: Median: 0,79 m 5 %: -0,10 m 95 %: 1,12 m Ost: Median: 1,14 m 5 %: 0,54 m 95 %: 1,56 m Messunsicherheit der bmO-Abweichung: max. große Halbachse: 0,12 m (95%) max. kleine Halbachse: 0,07 m (95%)
Überlebensfunktion/Rate	Relative Häufigkeit	100 %	
Ortsverfügbarkeit/ Punktverfügbarkeit	Relative Häufigkeit	100 %	
Ortswiederholgenauigkeit/Steigung	Steigung der Regressionsgeraden	1,10	
Ortsvergleichbarkeit/Steigung	Steigung der Regressionsgeraden	7,08	

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Kapitel fasst diese Arbeit zusammen. Zunächst wird die dieser Arbeit zugrunde liegende Motivation rekapituliert. Anschließend werden die Teilziele dieser Arbeit und die erforschten Ergebnisse herausgestellt. In dem letzten Unterkapitel dieser Arbeit wird mit einem Ausblick auf die sich aus der Arbeit entwickelten offenen Fragen und weiterführenden Forschungsarbeiten eingegangen.

9.1 Zusammenfassung

Satellitenbasierte Ortungssysteme ermöglichen fast überall auf der Erdoberfläche eine absolute Ortung. Bislang werden satellitenbasierte Ortungssysteme in der Luft- und Schifffahrt für sicherheitsrelevante Anwendungen eingesetzt und dort bedarf es der ständigen Überwachung durch einen Piloten oder Kapitän. Durch die Forderung nach zunehmendem Komfort und Sicherheit und einer höheren Effizienz ist derzeit das hochautomatisierte und autonome Fahren ein Forschungsschwerpunkt bei verschiedensten Unternehmen. Das Wissen über den eigenen absoluten und relativen Ort ist hierbei essenziell. Der Einsatz scheiterte bis heute an der Qualität der Ortungssysteme und deren Qualifizierung. Dabei wurden drei Hauptgründe identifiziert und als Problemstellung in diesem Dokument bearbeitet.

Ziel 1 – Eindeutige Definition der Qualitätsmerkmale

Die eindeutige Definition der Messqualität in Form von Merkmalen und Größen ist unabdingbar für eine normkonforme Qualitätsermittlung. Vorhandene Normen, Standards und Richtlinien ermöglichen durch die textliche Definition, die Vernachlässigung grober Abweichungen und den Messreihen zugrunde liegende Messwertverteilungen einen großen Interpretationsspielraum. Dies führt zu nicht vergleichbaren Prüfergebnissen zwischen Prüforganisationen und Prüfgegenständen.

Um dieses Hemmnis zu überwinden, wurden in Kapitel 4 vorhandene Normen, Standards und Richtlinien auf die eindeutige Definition der Qualitätsmerkmale und Berechnungsvorschriften geprüft und bewertet. Aufbauend darauf wurden in Kapitel 5 Qualitätsmerkmale in mathematischer Form unter Berücksichtigung der Bereinigung von Messreihen und der den Messreihen zugrunde liegenden Verteilung entwickelt. Neben den maßgeblichen Qualitätsmerkmalen der Ortung wurden weitere Qualitätsmerkmale wie die Wiederhol- und Vergleichbarkeit sowie die Ortungslatenz in eindeutiger mathematischer Form dargestellt. Die Qualitätsmerkmale wurden in Kapitel 8 auf real erhobene Messfahrten angewandt und weiter untersucht.

Ziel 2 – Behandlung der instationären Messbedingungen

Damit sicherheitsrelevante Fahrfunktionen oder Systeme, die auf satellitenbasierten Ortungssystemen beruhen, für den Verkehr zugelassen werden können, müssen diese konform zu DIN EN ISO/IEC 17025 geprüft werden. Dabei ist besonders wichtig, dass die Messungen transparent und glaubwürdig erhoben, durchgeführt und ausgewertet werden. Die Betrachtung und Dokumentation der Messbedingungen bei

GNSS-Prüffahrten hat bis heute nicht stattgefunden und ermöglicht daher keine Rückschlüsse auf die Messbedingungen während der Prüffahrt.

Um dieses Hemmnis zu überwinden, wurde ein neues Merkmal – der bestmögliche Ort - zur Quantifizierung der Messbedingungen eingeführt, um die während der Messung vorherrschenden Messbedingungen zu quantifizieren und Ausprägungen der Einflüsse auf das Messergebnis transparent zu gestalten. Da dieses Merkmal eine Vielzahl von Einflüssen quantifiziert und dies nicht ohne Unsicherheit möglich ist, wurde zusätzlich eine Messunsicherheitsuntersuchung für das Merkmal durchgeführt.

Sowohl die Bestimmung des Merkmals zur Quantifizierung der Messbedingungen als auch der korrespondierenden Messunsicherheit wurden anhand eines für diese Arbeit programmierten Werkzeuges CON-CAL analysiert. Die korrekte Implementierung der Algorithmen wurde anhand von Plausibilitätschecks und Vergleichen mit wissenschaftlichen Veröffentlichungen verifiziert.

Anschließend wurde das Merkmal zur Bewertung der Messbedingungen auf eine Messfahrt angewandt und die Messbedingungen quantifiziert. Dabei zeigte sich, dass durch die Korrekturwertabweichungen die vom Hersteller des Prüfgegenstands angegebenen Genauigkeiten für die Messfahrt nicht eingehalten werden, grundsätzlich der Prüfgegenstand die Spezifikation jedoch dennoch erfüllt.

Ziel 3 – Berücksichtigung des stochastischen Verhaltens von GNSS-Empfängern

Durch das stark ausgeprägte nichtlineare Verhalten von GNSS-Empfängern liefern Empfänger gleicher Bauart, Baureihe und Konfiguration, selbst wenn sie mit den gleichen Eingangssignalen versorgt werden, unterschiedliche Ortsinformationen. Um das stochastische Verhalten unabhängig von der zugrunde liegenden Verteilung zu quantifizieren, wurde in dieser Arbeit ein neues Maß entwickelt, das das stochastische Verhalten beschreibt.

Um das stochastische Verhalten zu quantifizieren, wurden die Merkmale der Wiederholgenauigkeit und Vergleichbarkeit eingeführt und für Messreihen, die keiner bekannten Verteilungsform entsprechen, erweitert. Das Verfahren wurde anschließend anhand eines Automotive-GNSS-Empfängers und eines Empfängers höchster Qualität verifiziert. Dabei konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Median der Ortsabweichung für die Prüffälle und der Wiederholgenauigkeit aufgezeigt werden. Für den geprüften Automotive-GNSS-Empfänger besitzt die Regressionsgerade eine deutlich größere Steigung als für den GNSS-Empfänger höchster Qualität.

9.2 Ausblick

In Laufe dieser Forschungsarbeit sind einige Fragestellungen aufgetreten, die in der Zukunft aufgegriffen werden müssen, damit GNSS-Systeme für sicherheitsrelevante Anwendungen zugelassen werden können.

In dieser Arbeit wurde die Protektionsgrenze als Basis für die Integritätsbetrachtung von GNSS-Empfängern untersucht. Bis heute ist die Bestimmung der Protektionsgrenze von kombinierten Systemen nicht eindeutig geklärt und wird nur durch eine konservative Herangehensweise gelöst. Durch eine Bestimmung der Protektionsgrenze eines multi-Sensorsystems ohne konservative Überlagerung würden neue Potenziale insbesondere für das hoch-automatisierte und autonome Fahren ermöglicht, da dort die genaue und sichere Ortung eine Hauptaufgabe ist.

Des Weiteren ist das Werkzeug zur Bestimmung der bmOs lediglich auf das GPS-System und das SBAS-System EGNOS entwickelt. Mit der zunehmenden Anzahl von Galileo-Satelliten werden bald die ersten Automotive-GNSS-Systeme auf dem Markt sein, die mehrere Satellitensysteme unterstützen. Um darüber hinaus CONCAL auch in urbanen Umgebungen anzuwenden, bedarf es der Erweiterung des Programms zur Bestimmung der bmOs um den Einflussfaktor der Mehrwegeausbreitung. Für die Quantifizierung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Ein gängiges Verfahren ist die Ermittlung der Mehrwegeausbreitung anhand eines Referenzmessempfängers oder über sogenannte Ray-Tracing Ansätze. Beim Ermitteln der Mehrwegeausbreitung anhand eines Referenzmessempfängers ist das Ergebnis vom Empfängertyp abhängig und durch dessen stochastisches Verhalten mit großen Unsicherheiten behaftet. Ray-Tracing Ansätze wie Ergospace [Tirtaine/Marais 2013] oder QualiSIM [Jakobsen et al. 2013]) liefern gute Ergebnisse, sind jedoch mit einem hohen Modellierungs- und Rechenaufwand verbunden. Zusätzlich wird für die Ray-Tracing Ansätze eine Karte mit hoher Genauigkeit benötigt.

In dieser Arbeit wurde das stochastische Verhalten von zwei GNSS-Empfängern für unterschiedliche Szenarien untersucht. Dabei ist offen, welcher Anteil an der Wiederholgenauigkeit auf den ausgewählten Transientenrekorder zurückzuführen ist. Die Genauigkeit der Signalaufzeichnung und Signalabspiegelung muss detailliert untersucht werden, um deren Einfluss auf das Messergebnis abzuschätzen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Komponenten bei der Zertifizierung.....	4
Abbildung 1-2 Dilution of Precision über einen Betrachtungszeitraum von 24 Stunden	8
Abbildung 1-3: Unterschiedliche Trajektorien gleicher Empfänger gleicher Bauart.....	10
Abbildung 1-4: Struktur der Arbeit.....	11
Abbildung 2-1: Vergleich von Messergebnissen mit Hilfe von Messunsicherheiten	16
Abbildung 2-2 Exemplarische Messabweichungen während der Qualifizierung	18
Abbildung 2-3: Trajektorien während des Prüfprozesses.....	19
Abbildung 3-1: Vektorielle Darstellung der Erde, des Satelliten und Empfängers.....	24
Abbildung 3-2: Troposphärische Laufzeitverlängerung über den Satellitenelevationsgrad	38
Abbildung 3-3: Verschiedene Ausprägungen von Mehrwegeeffekten;	39
Abbildung 3-4: Unterschiedliche Trajektorien auf einer Achterbahn.....	40
Abbildung 4-1: Messdatenfluss und Anforderungen an die einzelnen Schritte.	46
Abbildung 5-1: Relevante Qualitätsmerkmale verschiedener Akteure in der GNSS-Entwicklung	57
Abbildung 5-2: Schematische Darstellung verschiedener Prüfgrößen in einem GNSS-Empfänger.....	58
Abbildung 5-3: Vergleich der Qualitätsmerkmale mit spezifizierten Anforderungen	61
Abbildung 5-4: Einschwingbereich der Protektionsgrenze ab Beginn der Messung	63
Abbildung 5-5: Terminologisch-strukturelle Beschreibung der Ortsgenauigkeit	65
Abbildung 5-6: Zweidimensionale Darstellung der Messgenauigkeit für die Ortsgenauigkeit	67
Abbildung 5-7: Verschiedene Ortsabweichungsmaße für korrelierte Stichproben.....	68
Abbildung 5-8: Ortsabweichung für drei Wiederholfahrten.	71
Abbildung 5-9: Wiederholgenauigkeit für einen Automotive-GNSS-Empfänger	72
Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Protektionsgrenze und der Alarmgrenze	73
Abbildung 5-11: Stanford-Diagramm zur Kategorisierung des Systemzustands.....	74
Abbildung 5-12: Verlauf der Integrität für eine typische Messreihe.....	75
Abbildung 5-13: Unterscheidung statische und dynamische Integritätsverfügbarkeit.....	76
Abbildung 5-14: Einfluss der Latenz auf die Ortungsqualität für eine geradlinige Bewegung	84

Abbildung 5-15: Attributhierarchie der Kenngrößen zur Bewertung von Ortungssystemen.....	85
Abbildung 6-1: Bestmöglicher Ort und bestmögliche Ortsabweichung	90
Abbildung 6-2: Hierarchische Darstellung des bestmöglichen Orts	91
Abbildung 6-3: Generalisierte Darstellung des allgemeinen Vorgehens bei der Berechnung des bestmöglichen Orts.....	94
Abbildung 6-4: Darstellung des Monte-Carlo-Verfahrens	101
Abbildung 6-5: Bestmöglicher Ort im Kontext von Gefährdungsmodellen	108
Abbildung 7-1: Datenverlauf bei der Bestimmung des bestmöglichen Orts.....	114
Abbildung 7-2: Differenzen zwischen präzisen Orbitdaten und den Orbitdaten aus der Navigationsnachricht.....	116
Abbildung 7-3: Korrekturwertabweichungen durch die Troposphäre für einzelne Satelliten.....	117
Abbildung 7-4: Korrekturwertabweichungen durch die Ionosphäre für einzelne Satelliten.....	117
Abbildung 7-5: Trajektorien während der Qualifizierung.....	119
Abbildung 7-6: Auswertung der Messunsicherheit für einen Messwert	120
Abbildung 8-1: Prüfaufbau für die Prüffahrten	121
Abbildung 8-2: Darstellung der zweidimensionalen Prüftrajektorie.....	127
Abbildung 8-3: Horizontale Ortsgenauigkeit für das gesamte Prüfszenario	128
Abbildung 8-4: Ortsabweichung der einzelnen Vergleichsfahrten	131
Abbildung 8-5: Horizontale Ortsabweichungen der Vergleichsfahrten in Histogrammform	131
Abbildung 8-6: Wahrscheinlichkeitsplot der Querabweichung über die gesamte Fahrt.....	132
Abbildung 8-7: Häufigkeitsdiagramm der horizontalen Ortsabweichung über die gesamte Fahrt	133
Abbildung 8-8: Summenhäufigkeit für die Vergleichsfahrten	133
Abbildung 8-9: Vergleichbarkeit des GNSS-Empfängers für verschiedene Prüffälle kombiniert mit einer Regressionsgeraden	134
Abbildung 8-10: Wiederholt abgespielte Signale in unterschiedlichen Ausrichtungen.....	135
Abbildung 8-11: Histogramm der Wiederholfahrten für den Prüffall Autobahn	136
Abbildung 8-12: Summenhäufigkeitsverteilung für die Messfahrten und die wiederholt abgespielten Messsignale	138

Abbildung 8-13: Wiederholgenauigkeit für zwei Empfänger während der Vergleichsqualifizierung für verschiedene Szenarien kombiniert mit den Regressionsgeraden.....	138
Abbildung 8-14: Stanford-Diagramm zur Integrität.....	140
Abbildung 8-15: Überlebensfähigkeit der Vergleichsfahrten über alle Fahrten	142
Abbildung 8-16: Ortungslatenz des Prüfgegenstands und eines High-End-GNSS-Empfängers	143
Abbildung 8-17: Horizontale Ortsabweichung mit und ohne Ortungslatenzverzerrung.....	144
Abbildung 8-18: Horizontale Ortsabweichungen mit und ohne Ortungslatenzverzerrung der Messfahrt 13 für den Prüffall Autobahn.....	145
Abbildung 8-19: Bestmögliche Ortsabweichung in Nord	146
Abbildung 8-20: Bestmögliche Ortsabweichung in Ost.....	147
Abbildung 8-21: Streudiagramm des bestmöglichen Orts	148
Abbildung 8-22: Summenhäufigkeitsverteilungen der Ortsabweichungen der Wiederholfahrten	149
Abbildung 8-23: Komponenten der Messunsicherheit für den bestmöglichen Ort.....	150
Abbildung 8-24: 95. Perzentil der zusammengefassten Prüffahrten für ausgewählte Prüffälle	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich der Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit	21
Tabelle 3-1: Typisches UERE Abweichungsbudget für GPS Signale in der Ortung.....	27
Tabelle 3-2: Genauigkeit verschiedener Interpolationsverfahren	29
Tabelle 3-3: Messunsicherheit der Satellitenuhrbeobachtungen	31
Tabelle 3-4: Messunsicherheit der Bestimmung der ionosphärischen Laufwegverlängerung	33
Tabelle 3-5: Global gültige Konstanten für die Ifadis Mapping Funktion [vgl. Ifadis 2000]	36
Tabelle 3-6: Metrologische Parameter zur Schätzung der troposphärischen Laufzeitverlängerung	37
Tabelle 3-7: Zusammenfassung der Messunsicherheit der Einflüsse.....	43
Tabelle 4-1: Merkmalsvergleich von Normen, Standards und Richtlinien für die Qualitätsermittlung	55
Tabelle 5-1: Verschiedene Kategorien des Stanford-Diagramms	75
Tabelle 6-1: Klassifizierung von Messprinzipien.....	92
Tabelle 7-1: Auflistung der genutzten externen Daten.....	112
Tabelle 8-1: Vergleich verschiedener Referenzmesssysteme für die Qualifizierung.....	122
Tabelle 8-2: Konfiguration des Prüfgegenstands	125
Tabelle 8-3: Klassifizierung einzelner Prüffälle anhand erdnaheer Einflüsse.	126
Tabelle 8-4: Mittlere Ortspräzision für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten.....	129
Tabelle 8-5: 95. Perzentil der Ortsabweichung der einzelnen Vergleichsfahrten	130
Tabelle 8-6: Ortsgenauigkeit für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten.....	137
Tabelle 8-7: Resultate der Integritätsuntersuchung für die gesamten Vergleichsfahrten.....	141
Tabelle 8-8: Überlebensraten für die Vergleichsfahrten	141
Tabelle 8-9: Relative Häufigkeiten der Punktverfügbarkeiten.....	142
Tabelle 8-10: Einfluss der Messbedingungen während der Messfahrt.....	149
Tabelle 8-11: Konfidenzintervallgrenzen bei der Bestimmung des 95. Perzentiles.....	153
Tabelle 8-12: Korrelationskoeffizient zwischen der Quergenauigkeit.....	154
Tabelle 8-13: Darstellung des vollständigen Messergebnisses	155

Literaturverzeichnis

- [Adunka 2007] Adunka, F.: **Messunsicherheiten. Theorie und Praxis**, 3. Aufl., Vulkan-Verlag GmbH, Essen, Deutschland, 2007.
- [Ali et al. 2012] Ali, K.; Pini, M.; Dovis, F.: **Measured performance of the application of EGNOS in the road traffic sector**, in: GPS Solutions, Vol. 16 (2012), S. 135–145.
- [Askne/Nordius 1987] Askne, J. I. H.; Nordius, H.: **Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data**, in: Radio Science, Vol. 22 (1987) No. 3, S. 379–386.
- [AXIO-Net GmbH 2015] AXIO-Net GmbH: **AXIO-NET PED. Der Präzise Echtzeitdienst mit einer Messgenauigkeit von +/- 2cm**. 2015. [Zugriff am 24.07.2015]. Verfügbar unter: <http://www.axio-net.eu/produkte-loesungen/d/axio-net-ped/>.
- [Bétaille et al. 2016] Bétaille, D.; Peyret, F.; Ortiz, M.; Lykkja, O. M.; Oseth, S.-P.: **Position error modelling for sensitivity analysis of GNSS road applications**, in: Proceedings of ENC 2016. Helsinki, Finnland (2016).
- [Bevly/Cobb 2010] Bevly, D. M.; Cobb, S.: **GNSS for vehicle control**, Artech House, Boston, USA, 2010.
- [Bickel/Freedman 1981] Bickel, P. J.; Freedman, D. A.: **Some Asymptotic Theory for the Bootstrap**, in: The Annals of Statistics, Vol. 9 (1981) No. 6, S. 1196–1217.
- [Bosch/Wloka 2011] Bosch, W.; Wloka, M.: **Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien. Kommentar zu DIN EN ISO/IEC 17025**, Aufl. 2, Beuth, Berlin, Deutschland, 2011.
- [Brown/Chin 1998] Brown, R. Grover; Chin, Gerald Y.: **GPS RAIM: Calculation of thresholds and protection radius using chi-square methods. A geometric approach**, in: Navigation ION Red Book Series, Vol. 5 (1998).
- [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2017] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: **GNSS-Data Center**. 2017. [Zugriff am 17.02.2017]. Verfügbar unter: <https://igs.bkg.bund.de/>.
- [Caspary/Wichmann 2007] Caspary, W.; Wichmann, K.: **Auswertung von Messdaten. Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften**, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, Deutschland, 2007.
- [Chen et al. 2015] Chen, Y. H.; Lo, S.; Enge, P.; Akos, D.: **Combining L1 Signals for Improved Sensitivity**, in: Proceedings of International Technical Meeting (ITM) - The Institute of Navigation, Dana Point, USA (2015).

- [Cox/Siebert 2006] Cox, M. G.; Siebert, B. R. L.: **The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty** (2006) 43, S. 178–188.
- [Dach et al. 2015] Dach, R.; Hugentobler, U.; Fridez, P.; Meindl, M.: **Bernese GPS Software. Version 5.2**. 2015. [Zugriff am 05.04.2017]. Verfügbar unter: <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>.
- [Deutsche Bahn 2013] Deutsche Bahn: **Metalldiebstahl bei der DB und dem Einsatz von künstlicher DNA**. 2013. [Zugriff am 03.09.2013]. Verfügbar unter: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pi_regional/3914198/ssat20130513a.html.
- [DIN ISO 5725-2] Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e. V.; International Organization for Standardization. DIN ISO 5725-2: **Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 2 Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens**, 2002-12.
- [Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. Prüfstelle für Landmaschinen 2002] Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. Prüfstelle für Landmaschinen: **GPS-Empfänger Vergleich. Genauigkeit der statischen und dynamischen Positionierung**, in: DLG-Prüfbericht 5148 F (2002), S. 1–12.
- [DIN EN 50129] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 50129: **Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik**, 2003-12.
- [DIN 70028] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 70028: **Personenkraftwagen - Messung des Bremsweges bei ABS-Bremsungen geradeaus**, 2004-05.
- [DIN 1319-1-4] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1319-1-4: **Grundlagen der Messtechnik**, 2005-10.
- [DIN EN 16803-1] Deutsches Institut für Normung e.V.; Europäische Norm. DIN EN 16803-1: **Space - Use of GNSS-based positioning for road Intelligent Transport Systems (ITS) - Part 1: Definitions and system engineering procedures for the establishment and assessment of performances**, 2016-12.
- [DIN EN ISO/IEC 17025] Deutsches Institut für Normung e.V.; Europäische Norm; International Organization for Standardization; International Electrotechnical Commission. DIN EN ISO/IEC 17025: **Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien**, 01:2007.

- [Dietz et al. 2007] Dietz, H.; Sasum, R.; Meining, S.; Martin, S.; Voithenberg, M. v.; Besteman, U.; Becker, M.: **SEA GATE – The operational maritime Galileo testbed in Europe**, in: Proceedings of the ION GNSS 2007, Forth Worth, USA (2007).
- [Dodel/Häupler 2010] Dodel, H.; Häupler, D.: **Satellitennavigation**, Aufl. 2, Springer, Dordrecht, Deutschland, 2010.
- [Dziubek et al. 2012] Dziubek, N.; Winner, H.; Becker, M.; Leinen, S.: **Sensordatenfusion zur hochgenauen Ortung von Kraftfahrzeugen mit integrierter Genauigkeits- und Integritätsbewertung der Sensorsignale**, in: Konferenzband der 5. Tagung Fahrerassistenz München (2012).
- [Efron 1977] Efron, Bradley: **Bootstrap methods. Another look at the jackknife**, in: The Annals of Statistics, Vol. 7, No. 1 (1977), S. 1–26.
- [European GNSS Agency 2014a] European GNSS Agency: **EGNOS Open Service (OS). Service Definition Document** (2014).
- [European GNSS Agency 2014b] European GNSS Agency: **EGNOS Safety of Life (SoL). Service Definition Document**, 2014.
- [European New Car Assessment Programme 2015] European New Car Assessment Programme: **Test Protocol - AEB Systems**. 2015. [Zugriff am 13.06.2017]. Verfügbar unter: <http://euroncap.blob.core.windows.net/media/17719/euro-ncap-aeb-test-protocol-v11.pdf>.
- [European Space Agency 2016a] European Space Agency: **EGNOS Message Server**. 2016. [Zugriff am 17.02.2017]. Verfügbar unter: <http://www.egnos-pro.esa.int/ems/>.
- [European Space Agency 2016b] European Space Agency: **SBAS Teacher**. 2016. [Zugriff am 26.04.2016]. Verfügbar unter: <http://www.egnos-pro.esa.int/sbasteacher/>.
- [ETSI TS 103 246-5] European Telecommunications Standards Institute. ETSI TS 103 246-5: **Satellite Earth Stations and Systems (SES); GNSS based location systems; Part 5: Performance Test Specification**, 2016-01.
- [Feng/Zheng 2005] Feng, Yanming; Zheng, Yi: **Efficient interpolations to GPS orbits for precise wide area applications**, in: GPS Solutions, Vol. 9 (2005) No. 4, S. 273–282.
- [Fuhlbrügge 2004] Fuhlbrügge, Hans-Joachim: **Untersuchungen zur Prüfung von GPS-Echtzeitsystemen als Beitrag zur Qualitätssicherung im Vermessungswesen**. Dissertation, Bonn, Deutschland, 2004.
- [Gao et al. 2002] Gao, Y; Liao, X; Liu, Z.: **Ionosphere Modeling Using Carrier Smoothed Ionosphere Observations from a Regional GPS Network**, in: Geomatica, Vol. 56 (2002), S. 97–106.

- [GM AR 108] Ministeriums für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr. GM AR 108: **Gesetzliches Messwesen - Allgemeine Regelungen**, 2002-09.
- [GNSS Rail Advisory Forum 2014] GNSS Rail Advisory Forum: **Application and User Requirements**. [Zugriff am 18.10.2014]. Verfügbar unter: http://gali-leo.uic.asso.fr/docs/rail_users_req.pdf.
- [Godha 2006] Godha, S.: **Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application**. Dissertation, Calgary, Canada, 2006.
- [Grasso Toro 2015] Grasso Toro, Federico: **Development of Intelligent GNSS-based Land Vehicle Localisation Systems**. Dissertation, Braunschweig, Deutschland, 2015.
- [Grohne et al. 2012] Grohne, H.; Jäger, F.; Märtens, F.: **Einfluss einer Motorrad-Schräglage auf polizeiliche Geschwindigkeitsmessungen mit Videonachfahrssystemen. Teile 1 und 2**, in: Polizei Verkehr Technik, Vol. 57 (2012) Heft 3 & 4.
- [Hatch 1985] Hatch, R.: **The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements**, in: Proceedings of 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, USA (1985), S. 1213–1231.
- [Hedderich 2016] Hedderich, J.: **Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R**, Aufl. 15, Springer Spektrum, Berlin, Deutschland, 2016.
- [Hennes M. 2007] Hennes M.: **Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders**, in: Allgemeine Vermessungs Nachrichten, Vol. 4 (2007), S. 136–146.
- [Héroux/Kouba 2001] Héroux, P.; Kouba, J.: **GPS precise point positioning using IGS orbit products**, in: Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, Vol. 26 (2001) No. 6-8, S. 573–578.
- [Hesselbarth/Wanninger 2008] Hesselbarth, A.; Wanninger, L.: **Short-term Stability of GNSS Satellite Clocks and its Effects on Precise Point Positioning**, in: Proceedings of the ION GNSS 2008 Savannah, USA (2008), S. 1855–1863.
- [Hilla 2010] Hilla, S.: **The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c)**. 2010. [Zugriff am 24.11.2016]. Verfügbar unter: <https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3c.txt>.
- [Hodon 2013] Hodon, Michal: **On board localization technologies for vehicle positioning**. Dissertation, Zilina, Slovakia, 2013.
- [Hofmann-Wellenhof et al. 2003] Hofmann-Wellenhof, B.; Legat, K.; Wieser, M.: **Navigation. Principles of positioning and guidance**, Springer, Wien, Österreich, 2003.

- [Hopfield 1969] Hopfield, H. S.: **Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data**, in: Journal of Geophysical Research, Vol. 74 (1969) No. 18, S. 4487–4499.
- [Hoque/Jakowski] Hoque, Mainul; Jakowski, Norbert: **Ionospheric Propagation Effects on GNSS Signals and New Correction Approaches**. In: Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications, S. 381–404.
- [Ifadis 2000] Ifadis, Ioannis M.: **A new approach to mapping the atmospheric effect for GPS observations**, in: Earth Planets Space, Vol. 52 (2000), S. 703–708.
- [Institut für Verkehrssystemtechnik 2016] Institut für Verkehrssystemtechnik: **FASCar®**. 2016. [Zugriff am 02.02.2017]. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-1236/1690_read-13097/.
- [International Civil Aviation Organization 2006] International Civil Aviation Organization: **ICAO Annex 10 to the Convention of International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Volume 1, Radio Navigation Aids**, 2006.
- [IEC 61108-1] International Electrotechnical Commission. IEC 61108-1: **Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems- Global navigation satellite -systems (GNSS)-- Part 1: Global positioning system (GPS) – Receiver equipment – Performance standards, methods of testing and required test results**.
- [IEC 60050] International Electrotechnical Commission. IEC 60050: **International electro-technical vocabulary**, 2014-09.
- [ISO 26262-4] International Organization for Standardization. ISO 26262-4: **Road vehicles - Functional Safety**, 2011-11.
- [ISO 5725-1] International Organization for Standardization. ISO 5725-1: **Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions**, 1997-11.
- [ISO 17123-8] International Organization for Standardization. ISO 17123-8: **Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. - Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)**, 2007-09.
- [ISO 5459-1] International Organization for Standardization. ISO 5459-1: **Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Datums and datum systems**, 2016-05.

- [ISO/IEC 19501] International Organization for Standardization; International Electrotechnical Commission. ISO/IEC 19501: **Information technology - open distributed processing - unified modeling language (UML) version 1.4.2**, 2005-04.
- [ISO/IEC Guide 98-3] International Organization for Standardization; International Electrotechnical Commission. ISO/IEC Guide 98-3: **Propagations of distributions using a Monte Carlo method**.
- [Internationales Wörterbuch der Metrologie 2010] Internationales Wörterbuch der Metrologie: **Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM); ISO/IEC-Leitfaden 99:2007 = Vocabulaire international de métrologie = International vocabulary of metrology**, Dt.-engl. Fassung, 3. Aufl, Beuth, Berlin, Deutschland, 2010.
- [Irsigler 2008] Irsigler, M.: **Multipath Propagation, Mitigation and Monitoring in the Light of Galileo and Modernized GPS**. Dissertation, München, Deutschland, 2008.
- [Jakobsen et al. 2013] Jakobsen, J.; Jensen, A. B. O.; Marais, J.: **Simulating GNSS Position Accuracy using Non-line of Sight Reflected Signals**, in: Proceedings of ENC 2013, Wien, Österreich (2013).
- [Janes et al. 1991] Janes, H. W.; Langley, R. B.; Newby, S. P.: **Analysis of tropospheric delay prediction models: comparison with ray tracing and implications for GPS relative positioning**, in: Bulletin Géodésique, Vol. 65 (1991), S. 151–161.
- [JCGM 102] Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 102: **Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities**, 2011-10.
- [JCGM 100] Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100: **Evaluation of measurement data - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement**, 2008-09.
- [JRC TN 51300] Joint Research Center; European Commission. JRC TN 51300: **Area measurement validation scheme**, 2009.
- [Jörg Müller 2012] Jörg Müller: **Die formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit technischer Systeme**. Habilitation, Braunschweig, Deutschland, 2012.
- [Kaplan/Hegarty 2005] Kaplan, E.; Hegarty, C.: **Understanding GPS Principles and Applications. Principles and Applications**, Ed. 2, Artech House, Norwood, USA, 2005.
- [Katsougiannopoulos et al. 2006] Katsougiannopoulos, S.; Pikridas, C.; Rossikopoulos, D.; Ifadis, I. M.; Fotiou, A.: **Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data**, in: Proceedings of XXXIII FIG Congress (2006).

- [Kim/Lee 2015] Kim, J.; Lee, Y. J.: **Using ionospheric corrections from the space-based augmentation systems for low earth orbiting satellites**, in: GPS Solutions, Vol. 19 (2015) No. 3, S. 423–431.
- [Klobuchar 1987] Klobuchar, J.: **Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users**, in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 3 (1987), S. 325–331.
- [Kos et al. 2009] Kos, T.; Botincan, M.; Markezic, I.: **Evaluation of EGNOS Tropospheric Delay Model in South-Eastern Europe**, in: Journal of Navigation, Vol. 62 (2009) No. 2, S. 341–349.
- [Kouba 2009] Kouba, J.: **A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products**. 2009. [Zugriff am 12.06.2015]. Verfügbar unter: <http://acc.igs.org/UsingIGSProducts-Ver21.pdf>.
- [Krawinkel/Schön 2016] Krawinkel, T.; Schön, S.: **Benefits of receiver clock modeling in code-based GNSS navigation**, in: GPS Solutions, Vol. 20 (2016) No. 4, S. 687–701.
- [Langley 1995] Langley, R. B.: **NMEA 0183: A GPS Receiver Interface Standard**, in: GPS World, Vol. 2 (1995).
- [Le Marchand et al. 2015] Le Marchand, O.; Bonnifait, P.; Bañez-Guzmán, J.; Peyret, F.; Betaille, D.: **Performance Evaluation of Fault Detection Algorithms as Applied to Automotive Localisation**, in: Proceedings of ENC 2015 Bordeaux, France (2015).
- [Liang Heng 2012] Liang Heng: **Safe Satellite Navigation with Multiple Constellations. Global Monitoring of GPS and GLONASS Signal-In-Space Anomalies**. Dissertation, Stanford, USA, 2012.
- [Lu 2014] Lu, D.: **GNSS for Train Localisation Performance Evaluation and Verification**. Dissertation, Braunschweig, Deutschland, 2014.
- [Lu/Schnieder 2014] Lu, D.; Schnieder, E.: **Performance Evaluation of GNSS for Train Localization**, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 90 (2014).
- [Lu et al. 2016] Lu, D.; Spiegel, D.; Becker, U.; Cai, B.; Wang, J.; Liu, J.; Liu, X.: **Repeatability test method of GNSS for safe train localisation in real and simulated environments**, in: Proceedings of 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Savannah, USA (2016), S. 687–692.
- [Mansfeld 2010] Mansfeld, Werner: **Satellitenortung und Navigation. Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme; mit 65 Tabellen**, Aufl. 3, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, Deutschland, 2010.

- [Manz 2016] Manz, H.: **Methode zur Sicherheitsnachweisführung einer bordautonomen satellitenbasierten Ortungseinheit für den Schienenverkehr**, Shaker, Herzogenrath, Deutschland, 2016.
- [Manz et al.] Manz, H.; Rütters, R.; Schäfer, B.; Engelhardt, T.: **Metrological standardization for rail applications of satellite based localization systems**. In: Proceedings of EURO-ZEL, Zilina, Slovakia.
- [Mark Petovello 2011] Mark Petovello: **GNSS Solutions: Clock Offsets in GNSS Receivers**, in: Inside GNSS (2011) No. 2, S. 23–25.
- [Mark Petovello 2014] Mark Petovello: **What are the actual performances of GNSS positioning using smartphone technology?**, in: Inside GNSS (2014) Vol. 6, S. 34–37.
- [Märtens et al. 2014] Märtens, F.; Kupper, J.; Ludwig, K-P; Markus, J.; Nickel, W.; Jäger, F.: **Quantitative Fehleranalyse bei videobasierten VKS-Abstandsmessungen mit Präzisions-GPS-Inertialsystem**, in: Polizei Verkehr Technik, Vol. 59 (2014) Heft 4.
- [Min et al. 2008] Min, M.; Ehsani, R.; Salyani, M.: **Dynamic Accuracy of GPS Receivers in Citrus Orchards**, in: American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 24 (2008) No., S. 861–868.
- [Misra/Enge 2011] Misra, P.; Enge, P.: **Global positioning system. Signals, measurements, and performance**, Ed. 2, Ganga-Jamuna Pr., Lincoln, USA, 2011.
- [Montenbruck et al. 2015] Montenbruck, O.; Steigenberger, P.; Hauschild, A.: **Broadcast versus precise ephemerides. A multi-GNSS perspective**, in: GPS Solutions, Vol. 19 (2015) No. 2, S. 321–333.
- [National Instruments 2013] National Instruments: **GPS Receiver Testing**. 2013. [Zugriff am 10.12.2014]. Verfügbar unter: <http://www.ni.com/white-paper/7189/en/pdf>.
- [STANAG 4278] North Atlantic Treaty Organization. STANAG 4278: **Method of Expressing Navigation Accuracies**, 1995-3.
- [O’Hagan/Stevens 2003] O’Hagan, A.; Stevens, J. W.: **Assessing and comparing costs: how robust are the bootstrap and methods based on asymptotic normality?**, in: Health economics, Vol. 12 (2003), S. 33–49.
- [Opitz et al. 2007] Opitz, M.; Weber, R.; Winkler, W.: **A critical assessment of the current EGNOS performance**, in: Vermessung & Geoinformation, Vol. 2 (2007), S. 143–150.
- [Oxford Technical Solutions Limited 2014] Oxford Technical Solutions Limited: **RT3000: Hochpräzise GPS gestützte Inertialmesssysteme - Datenblatt**. 2014. [Zugriff am

- 23.7.2015]. Verfügbar unter: http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/RT3000_DE.pdf.
- [Oxford Technical Solutions Limited 2015] Oxford Technical Solutions Limited: **User Manual RT3200. Covers all RT models**. 2015. [Zugriff am 26.08.2016]. Verfügbar unter: <http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/rtman.pdf>.
- [Penna et al. 2001] Penna, N.; Dodson, A.; Chen, W.: **Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model**, in: Journal of Navigation, Vol. 54 (2001), S. 37–55.
- [Physikalisch-Technische Bundesanstalt 2016] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: **Analysis of dynamic measurements. Working Group 8.42**. 2016. [Zugriff am 30.11.2016]. Verfügbar unter: <https://www.ptb.de/cms/nc/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-842/dynamischmessungen-842.html>.
- [Poliak 2009] Poliak, J.: **Validierung von satellitenbasierten Eisenbahnortungssystemen**. Dissertation, Braunschweig, Deutschland, 2009.
- [Powell et al. 2007] Powell, J. D.; Walter, T.; Kim, E.; Peled, U.: **Use of the Wide Area Augmentation System (WAAS) as a Reference for Flight Inspection. Final Report - FAA Contract AC-05-00695**. 2007. [Zugriff am 08.12.2016]. Verfügbar unter: https://www.faa.gov/air_traffic/flight_info/avn/flightinspection/onlineinformation/pdf/WAAS_Stanford_Final_Report.pdf.
- [DO-229-D] Radio Technical Commission for Aeronautics DO-229-D: **Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment**.
- [Rakowsky/Richardson 2001] Rakowsky, U.; Richardson, N.: **Wörterbuch der Zuverlässigkeit, Life-Long-Learning**, Hagen, Deutschland, 2001.
- [Reckter 2017] Reckter, B.: **Infrastrukturloses Warnsystem wäre einsatzbereit**. 2017. [Zugriff am 06.03.2017]. Verfügbar unter: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Infrastrukturloses-Warnsystem-waere-einsatzbereit>.
- [Richter et al. 2013a] Richter, R. C.; Wolf, B.; Michler, O.: **Field and laboratory test results using a multichannel signal generator for vehicle positioning systems operating in weak GNSS signals environments**, in: Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2013, Outrigger, Australia (2013).
- [Richter et al. 2013b] Richter, R.; Wolf, B.; Michler, O.: **Evaluation of GNSS RF-Signal Simulators and - Receivers based on Recorded Multi GNSS Signals in Scenarios of Traffic**

- Telematics**, in: Proceedings of International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation ION GNSS+ Meeting, Nashville, USA (2013).
- [Rife et al. 2004] Rife, Jason; Pullan, Sam; Pervan, Boris; Enge, Per: **Paired Overbounding and Application to GPS Augmentation**, in: Proceedings of Position Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, USA (2004).
- [Rife/Pervan 2012] Rife, Jason; Pervan, Boris: **Overbounding Revisited. Discrete Error-Distribution Modeling for Safety-Critical GPS Navigation**, in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 48 (2012) No. 2, S. 1537–1551.
- [Salós et al. 2010] Salós, D.; Macabiau, C.; Martineau, A.; Bonhoure, B.; Kubrak, D.: **Analysis of GNSS integrity requirements for road user charging applications**, in: Proceedings of 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 5 (2010).
- [Schenewerk 2003] Schenewerk, M.: **A brief review of basic GPS orbit interpolation strategies**, in: GPS Solutions, Vol. 6 (2003) No. 4, S. 265–267.
- [Schmidt et al. 2011] Schmidt, Martin; Rau, Marcus; Helmig, Ekkehard; Bauer, Bernhard: **Funktionale Sicherheit – Umgang mit Unabhängigkeit, rechtlichen Rahmenbedingungen und Haftungsfragen**, in: Hanser automotive (2011) 11/12, S. 38–42.
- [Schnieder 2010] Schnieder, L.: **Formalisierte Terminologien technischer Systeme und ihrer Zuverlässigkeit**. Dissertation, Braunschweig, Deutschland, 2010.
- [Schnieder 2012] Schnieder, E.: **Qualität dynamischer Satellitenortung im Eisenbahnverkehr. Quality of Dynamic Satellite Localisation for Railways**, in: Technisches Messen (2012) Heft 4, S. 210–219.
- [Schnieder/Barbu 2009] Schnieder, E.; Barbu, G.: **Potenziale satellitenbasierter Ortung für Eisenbahnen**, in: Eisenbahntechnische Rundschau (2009) Heft 1+2, S. 38–43.
- [Schnieder/Schnieder 2013] Schnieder, E.; Schnieder, L.: **Verkehrssicherheit. Maße und Modelle, Methoden und Maßnahmen für den Straßen- und Schienenverkehr**, Springer Vieweg, Berlin, Deutschland, 2013.
- [Schön/Kutterer 2006] Schön, S.; Kutterer, H.: **Uncertainty in GPS Networks due to Remaining Systematic Errors: The Interval Approach**, in: Journal of Geodesy, Vol. 80 (2006) No. 3, S. 150–162.
- [Schüler 2001] Schüler, T.: **On ground-based GPS tropospheric delay estimation**. Dissertation, München, Deutschland, Univ. d. Bundeswehr Fak. f. Bauingenieur- u. Vermessungswesen Studiengang Geodäsie u. Geoinformation, Neubiberg, Deutschland, 2001.

- [Schwieger 2008] Schwieger, V.: **High-Sensitivity GPS – an Availability, Reliability and Accuracy Test**, in: Proceedings on FIG Working Week, Stockholm, Schweden (2008).
- [Siebertz et al. 2010] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: **Statistische Versuchsplannung**, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Deutschland, 2010.
- [Smith/Weintraub 1952] Smith, Ernest K.; Weintraub, Stanley: **The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies**. NBS report, 1952.
- [Sommer/Siebert 2006] Sommer, Klaus-Dieter; Siebert, Bernd R. L.: **Korrelation und Messunsicherheit**, in: PTB-Mitteilungen 116 (2006) Heft 3, S. 263–273.
- [Spiegel et al. 2014] Spiegel, Dirk; Grasso Toro, Federico; Schnieder, Eckehard: **A Satellite Independent High Dynamic Test Bed and First Measurement Results**, in: Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Tampa, USA (2014), S. 433–439.
- [Spiegel/Becker 2015] Spiegel, D.; Becker, U.: **A latency and accuracy investigation of satellite receivers for automotive applications.**, in: Proceedings of the International Symposium on Certification of GNSS Systems & Services - CERGAL, Dresden, Deutschland (2015).
- [Spiegel et al. 2016a] Spiegel, D.; Geffert, A.; Schieder, E.; Lu, D.: **Stochastic behaviour quantification of GNSS receivers.**, in: Coordinates (2016) 11, S. 12–16.
- [Spiegel et al. 2016b] Spiegel, D.; Lu, D.; Schnieder, E.: **Introduction of a new quantity for the stochastic behavior quantification of GNSS receivers.**, in: Proceedings of the ENC 2016, Helsinki, Finnland (2016).
- [Spirent 2014] Spirent: **GSS6425 GNSS Multi-Frequency Record Playback System. Datasheet MS3091**. 2014. [Zugriff am 06.10.2015]. Verfügbar unter: <https://www.spirent.com/Products/GSS6425>.
- [Spirent Communications PLC 2015] Spirent Communications PLC: **Spirent SimGEN with the GSS6700 Multi-GNSS Simulator. Datasheet MS3084**. 2015. [Zugriff am 23.06.2017]. Verfügbar unter: https://www.spirent.com/-/media/Datasheets/Positioning/GSS6700_with_SimGEN.pdf.
- [Stanford University (WADGPS Laboratory) 1997] Stanford University (WADGPS Laboratory): **WAAS Precision Approach Metrics. Accuracy, Integrity, Continuity and Availability**. 1997]. Verfügbar unter: <http://waas.stanford.edu/metrics.htm>.

- [Stanford University GPS Laboratory 2017] Stanford University GPS Laboratory: **Stanford University GPS Laboratory Ephemeris Files**. [Zugriff am 17.02.2017]. Verfügbar unter: <https://gps.stanford.edu/SUGL-ephemeris-files>.
- [Stanisak et al. 2015] Stanisak, M.; Bestmann, U.; von Hünenbein, K.; Lange, W.: **Measured GNSS Jamming Events at German Motorways**, in: Proceedings of the Position Navigation Konferenz (POSNAV), Berlin, Deutschland (2015).
- [Statistisches Bundesamt 2013] Statistisches Bundesamt: **Unfallentwicklung auf deutschen Straßen 2012**, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Deutschland, 2013.
- [Stelzer et al. 2004] Stelzer, A.; Pourvoyeur, K.; Fischer, A.: **Concept and application of LPM. a novel 3-D local position measurement system**, in: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52 (2004) 12, S. 2664–2669.
- [Strang/Meyer zu Hörste 2006] Strang, T.; Meyer zu Hörste, M.: **Galileo as a kernel for Railway Collision Avoidance System**, in: Proceedings of NavAge 2006, Prag, Tschechien (2006).
- [Symeo GmbH 2016] Symeo GmbH: **Symeo Datasheet LPR-2D: Precise Position Detection Indoors and Outdoors**. 2016. [Zugriff am 20.12.2016]. Verfügbar unter: http://www.symeo.com/cms/upload/pdf/en/DataSheets/Symeo_Datasheet_LPR-2D.pdf.
- [ION STD 101] The Institute of Navigation. ION STD 101: **Recommended Test Procedures for GPS Receivers**, 1997-C.
- [Tirtaine/Marais 2013] Tirtaine, T.; Marais, J.: **Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayons Ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation**, in: INRETS, Vol. H 102 (2013), S. 50–54.
- [Trimble Germany GmbH 2016] Trimble Germany GmbH: **Datenblatt Trimble S9 und S9 HP Totalstationen**. 2016. [Zugriff am 20.12.2016]. Verfügbar unter: http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-776487/022516-155B-DEU_TrimbleS9_S9HP_DS_A4_0715_LR.pdf.
- [Trzuskowsky et al. 2014] Trzuskowsky, A.; Abel, D.; Pölöskey, M.; Hoelper, C.: **New Test Facilities For GNSS Testing And Dynamic Calibration**, in: Annual of Navigation, Vol. 21 (2014).
- [U. S. Department of Defence, U. S. Department of Homeland Security and U. S. Department of Transportation 2010] U. S. Department of Defence, U. S. Department of Homeland Security and U. S. Department of Transportation: **Federal Radionavigation Plan. DOT-VNTSC-RITA-08-02/DoD-4650.05**, 2010.

- [U. S. Department of Defense 1995] U. S. Department of Defense: **Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification**, Ed. 2, 1995.
- [U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation 2014] U. S. Department of Defense, U. S. Department of Transportation: **Federal Radionavigation Plan. DOT-VNTSC-OST-R-15-01**, Department of Defense, Department of Homeland Security and Department of Transportation, 2014.
- [U.S. Department of Transportation 2012] U.S. Department of Transportation: **Airworthiness Approval of Positioning and Navigation Systems. 20-138-C**, 2012.
- [van Diggelen 1998] van Diggelen, F.: **GPS Accuracy: Lies, Damn lies, and Statistics**, in: GPS World (1998) No. 1.
- [van Diggelen 2007] van Diggelen, F.: **GNSS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics**, in: GPS World (2007) No. 1, 26:32.
- [Velaga et al. 2012] Velaga, N. R.; Quddus, M. A.; Bristow, A. L.; Zheng, Y.: **Map-Aided Integrity Monitoring of a Land Vehicle Navigation System**, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13 (2012) No. 2, S. 848–858.
- [Verein Deutscher Ingenieure e. V. 2017] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: **Technische Zuverlässigkeit - Begriffe. VDI-Statusreport**. 2017. [Zugriff am 2017]. Verfügbar unter: <PDFhttps://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpp_dateien/2017-04_GPP_Statusreport_Zuverlaessigkeit_aktualisiert.pdf>.
- [WADGPS Laboratory (University) 1999] WADGPS Laboratory (University): **WAAS Precision Approach Metrics Accuracy, Integrity, Continuity and Availability**. 1999. [Zugriff am 24.08.2016]. Verfügbar unter: <http://waas.stanford.edu/metrics.html>.
- [Warren 2002] Warren, D. L. M.: **Broadcast vs. Precise GPS Ephemerides. A historical perspective**. Dissertation, Ohio, USA, 2002.
- [Warren/Raquet 2003] Warren, D. L. M.; Raquet, J. F.: **Broadcast vs. precise GPS ephemerides. A historical perspective**, in: GPS Solutions, Vol. 7 (2003) No. 3, S. 151–156.
- [Wegener 2013] Wegener, M.: **Über die metrologische Qualität der Fahrzeugortung**. Dissertation, Braunschweig, Deutschland, 2013.
- [Wegener/Schnieder 2012] Wegener, M.; Schnieder, E.: **A Measurement Standard for Vehicle Localization and Its ISO-Compliant Measurement Uncertainty Evaluation**, in: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 61 (2012) No. 11, S. 3003–3013.

- [Wegener/Schnieder 2013] Wegener, M.; Schnieder, E.: **Application of the GUM method for state-space systems in the case of uncorrelated input uncertainties**, in: Measurement Science and Technology, Vol. 24 (2013) No. 2.
- [Winner 2009] Winner, H.: **Handbuch Fahrerassistenzsysteme**, Springer Fachmedien, Wiesbaden, Deutschland, 2009.
- [Zheng/Cross 2012] Zheng, Y.; Cross, P.: **Integrated GNSS with different accuracy of track database for safety-critical railway control systems**, in: GPS Solutions, Vol. 16 (2012) No. 2, S. 169–179.
- [Zweigle et al. 2016] Zweigle, R.; Hoppe, M.; Engelhardt, T.; Kleeßen, R.; Abel, D.; Heßeler, F.-J.; Funke, O.: **Galileo-Testzentren GATEs in Deutschland: Fit für Europas zukünftiges Satellitennavigationssystem Galileo**, in: zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (2016) Heft 4, 223-230.

Anhang 1 – Ortsabweichungen der Vergleichsfahrten in weiteren Koordinatensystemen

Nord- und Ostortspräzision

Mittlere Ortspräzision in Nord für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

Prüffälle	Prüffahrten																Mittel
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	Mittlere Ortspräzision in Nord in m																
Großstadt mit Begrünung	-7,4	-4,1	1,7	0,0	-7,9	-3,4	-3,6	-1,0	-1,5	-1,0	2,4	-1,2	-3,6	-1,4	1,0	-1,4	-2,0
Großstadt wenig Begrünung	-3,2	2,0	-0,6	0,4	0,0	1,0	-1,4	1,0	0,7	-0,3	-1,2	-0,2	-1,7	0,5	-0,3	0,0	-0,2
Großstadt keine Begrünung	-13,8	-3,9	-0,1	-1,8	-2,1	-4,1	-1,6	-0,5	-1,0	-0,8	-1,8	-0,5	-2,3	-1,7	0,2	-1,7	-2,3
Große Steinbrücken	-1,3	-2,8	-1,7	0,2	-2,2	0,5	-1,0	-1,8	0,7	0,6	-2,0	-1,1	-3,5	-0,1	-1,0	-0,8	-1,1
Enge Eisenbrücken	51,9	119,6	82,0	105,3	43,2	47,0	132,0	52,6	43,3	47,8	102,7	45,7	61,1	49,8	51,3	49,9	67,8
Autobahndurchfahrt	54,8	12,1	12,0	-1,0	29,5	4,4	12,1	0,6	10,8	1,4	7,0	5,4	4,0	14,7	10,1	0,6	9,6
Autobahndurchfahrt 2	47,4	28,8	1,8	3,1	11,6	15,5	6,7	7,1	3,3	12,2	22,1	56,9	11,4	10,6	1,9	9,1	0,9
Überlandfahrt	-0,7	-0,7	-1,3	-0,2	-1,4	-0,6	-1,4	0,5	-1,2	-0,4	-1,3	-0,6	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8
Waldfahrt	5,1	6,4	1,1	-3,2	6,5	4,5	0,5	1,5	-0,7	-0,2	-1,8	5,2	0,7	-0,7	1,4	NaN	1,8
Autobahnfahrt	NaN	-1,1	-0,7	-0,5	-0,4	-1,7	-0,2	-0,7	-1,0	-0,3	-1,4	-1,8	-1,4	-0,7	-0,7	NaN	-0,9
Stadtfahrt 1	-1,9	-1,4	-1,3	-0,8	-0,5	-1,1	-0,3	-1,1	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-1,3	-1,2	0,8	0,2	-0,7
Stadtfahrt 2	-0,8	-1,6	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-1,8	0,2	-1,5	-0,8	-0,3	-0,9	-1,1	0,1	-0,5	-0,5	-0,7
Überlandfahrt 2	NaN	-0,1	-0,9	-0,5	0,1	-0,1	-0,9	1,2	-1,0	0,0	-1,6	0,9	-0,9	-0,7	-0,3	NaN	-0,3
Gesamte Fahrt	-3,7	-0,3	-0,6	-1,1	-0,2	-0,3	-1,4	0,2	-1,0	-0,4	-1,1	-0,4	-1,3	-1,0	-0,2	-0,9	

5. Perzentil in Nord für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

Prüffälle	Prüffahrten																Mittel
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	5. Perzentil der Ortsabweichung in Nord in m																
Großstadt mit Begrünung	22,5	11,3	4,9	5,0	68,6	9,2	11,3	7,6	3,7	3,4	8,9	5,2	15,4	13,4	2,1	3,0	12,2
Großstadt wenig Begrünung	-9,3	-2,6	-3,3	-0,9	-1,2	-2,5	-4,0	-0,4	-1,0	-7,8	-3,7	-1,6	-9,2	-5,5	-1,8	-1,2	3,5
Großstadt keine Begrünung	31,4	8,7	3,3	6,7	6,2	10,2	3,9	3,5	2,7	2,1	6,3	2,2	7,1	5,3	3,6	4,8	6,8
Große Steinbrücken	14,5	-26,1	-6,9	-9,1	11,2	-5,7	-8,7	-8,5	-2,9	10,8	-7,6	11,4	-16,8	-4,3	12,2	17,9	10,9
Enge Eisenbrücken	58,3	136,6	124,3	121,1	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	53,5	119,6	NaN	134,3	NaN	NaN	NaN	106,8
Offene Autobahndurchfahrt	79,6	2,3	19,8	5,7	47,0	14,1	18,9	3,5	17,4	2,2	11,7	11,3	6,0	21,3	15,5	2,6	17,4
Offene Autobahndurchfahrt 2	86,7	-3,5	-13,1	-10,3	30,1	-0,4	10,0	17,4	-8,9	-0,4	-5,4	84,5	-9,4	17,2	-4,3	13,4	19,7
Überlandfahrt	-1,8	-1,8	-2,0	-0,6	-2,2	-1,0	-3,0	-0,2	-1,6	-1,2	-1,7	-2,0	-1,6	-2,2	-1,0	-4,1	-1,7
Waldfahrt	-4,1	-2,9	-3,6	-38,8	-7,9	-4,0	-3,6	-0,9	-4,1	-3,5	-8,3	-2,2	-9,9	-4,0	-1,5	NaN	-7,3
Autobahnfahrt	NaN	-2,0	-1,2	-0,9	-1,3	-2,6	-0,4	-1,0	-1,6	-0,5	-2,1	-4,7	-2,1	-0,9	-1,0	NaN	-1,6
Stadtfahrt 1	-5,1	-2,2	-2,9	-2,2	-1,1	-1,8	-0,5	-4,4	-0,5	-2,1	-5,2	-0,8	-2,0	-2,2	-0,7	-0,6	-2,1
Stadtfahrt 2	-5,9	-2,9	-1,7	-1,1	-1,6	-1,9	-3,5	-0,7	-1,9	-1,5	-1,4	-1,5	-1,8	-1,1	-1,1	-1,1	-1,9
Überlandfahrt 2	NaN	-4,7	-1,9	-1,3	-1,3	-1,6	-2,5	0,6	-1,6	-0,5	-3,7	-1,9	-1,9	-1,2	-0,9	NaN	-1,7
Gesamte Fahrt	22,4	-6,0	-2,8	-7,2	-4,4	-5,6	-4,4	-2,8	-2,8	-3,4	-4,9	-3,0	-6,0	-4,6	-1,7	-3,1	

95. Perzentil in Nord für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	95. Perzentil der Ortsabweichung in Nord in m																
Großstadt mit Begrünung	0,0	1,2	15,8	4,5	1,3	0,4	2,0	4,5	0,0	1,8	14,6	1,9	10,5	9,7	16,9	-0,1	5,3
Großstadt wenig Begründung	6,9	9,9	2,1	1,8	2,0	8,7	0,1	3,2	2,6	2,5	1,3	1,3	2,9	4,6	1,1	1,3	3,3
Großstadt keine Begrünung	-0,3	0,1	4,3	1,3	0,3	1,4	0,0	1,4	0,4	0,9	5,1	1,0	1,0	-0,2	2,6	0,7	1,3
Große Steinbrücken	8,9	14,3	0,1	11,7	3,8	19,2	10,8	1,2	11,5	14,3	4,4	7,0	3,7	7,5	2,7	15,3	8,5
Enge Eisenbrücken	-50,2	-93,7	-47,9	-83,9	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	-45,9	-87,2	NaN	-3,2	NaN	NaN	NaN	-58,9
Offene Autobahndurchfahrt	-3,8	22,6	-1,4	2,4	-2,4	2,5	-4,2	1,6	-3,2	4,6	-1,3	-1,4	-1,0	-2,1	-2,1	0,6	0,7
Offene Autobahndurchfahrt 2	-1,6	62,8	10,4	1,8	50,9	24,8	-4,0	1,1	21,1	26,5	38,5	-2,2	27,8	-3,2	10,0	33,7	18,7
Überlandfahrt	-0,1	0,2	-0,7	0,4	-0,6	0,0	-0,4	1,4	-0,7	0,4	-0,9	0,9	-0,1	-0,2	-0,4	0,6	0,0
Waldfahrt	24,3	23,2	11,2	18,2	35,1	23,8	7,3	6,8	3,0	9,5	4,5	17,6	10,1	2,5	8,8	NaN	13,7
Autobahnfahrt	NaN	0,1	-0,3	-0,1	1,0	-0,9	0,1	-0,4	-0,4	-0,1	-0,8	0,6	-1,1	-0,3	-0,4	NaN	-0,2
Stadtfahrt 1	1,5	-0,5	0,0	0,4	0,3	-0,3	0,0	1,2	0,6	0,4	3,6	-0,2	-0,7	-0,3	1,9	1,2	0,6
Stadtfahrt 2	8,0	-0,7	-0,1	0,1	0,8	1,9	-0,4	1,3	-0,9	0,2	1,1	-0,4	-0,5	2,0	1,5	0,0	0,9
Überlandfahrt 2	NaN	5,1	-0,1	0,3	2,8	2,9	0,5	2,2	-0,6	1,4	-0,9	6,1	-0,1	0,4	1,0	NaN	1,5
Gesamte Fahrt	6,4	8,9	3,1	4,1	8,4	7,1	0,8	2,5	1,3	2,4	3,3	4,4	3,0	1,7	2,4	0,8	

Mittlere Ortspräzision in Ost für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	Mittlere Ortspräzision in Ost in m																
Großstadt mit Begrünung	-0,7	1,9	1,8	1,9	5,5	2,6	0,7	0,4	0,9	1,5	2,6	0,9	1,9	0,6	-0,7	1,3	1,4
Großstadt wenig Begründung	0,4	1,4	-0,1	0,0	-0,3	-0,9	0,0	-0,8	0,8	-3,7	-0,1	0,1	0,1	-0,6	-0,2	-0,8	-0,3
Großstadt keine Begrünung	-1,0	0,7	0,0	0,0	0,4	1,7	0,1	0,9	0,6	0,0	1,3	0,0	0,5	-0,3	-1,3	-0,7	0,2
Große Steinbrücken	2,0	-0,8	-0,1	0,2	-0,6	-0,8	0,3	0,4	-0,7	-1,1	-0,7	-1,8	1,0	0,2	-0,5	0,5	-0,1
Enge Eisenbrücken	-6,8	-36,0	-12,6	-4,5	-1,3	-9,6	-15,8	-16,4	-10,4	-12,1	-16,3	-19,3	-8,2	-13,4	-10,2	-13,3	-12,9
Offene Autobahndurchfahrt	-6,9	-5,9	7,9	5,3	8,5	8,4	4,3	4,5	2,9	1,6	7,6	3,5	0,1	5,8	8,8	3,3	3,7
Offene Autobahndurchfahrt 2	27,1	-4,8	39,4	7,4	31,3	4,0	6,1	33,9	2,0	-3,9	51,3	42,0	27,9	12,3	6,0	-4,7	17,3
Überlandfahrt	-0,1	-0,6	-0,4	-0,6	-0,1	-0,6	-0,2	0,2	-0,2	-0,7	-0,3	-0,3	-1,9	-1,8	-0,2	-0,7	-0,5
Waldfahrt	2,4	3,0	-0,2	7,8	1,4	1,9	-0,1	2,2	0,3	2,5	-0,2	0,9	-0,2	-1,4	0,7	NaN	1,4
Autobahnfahrt	NaN	0,2	0,4	-0,9	-0,3	-0,2	-0,4	-0,2	-0,7	-0,5	0,2	-1,2	-0,6	-0,3	-0,3	NaN	-0,3
Stadtfahrt 1	-0,2	0,5	-0,7	-0,8	-0,4	1,0	0,2	-1,0	0,8	-0,7	-1,0	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,7	-0,2
Stadtfahrt 2	0,0	-0,5	-0,4	0,0	0,0	-0,9	0,1	0,1	0,7	-0,5	-0,2	-1,3	-0,1	-1,7	-1,0	-0,2	-0,4
Überlandfahrt 2	NaN	0,9	-0,2	-0,5	-0,4	-0,1	-0,1	0,6	-0,8	-0,6	0,1	-0,8	-0,3	0,0	0,0	NaN	-0,2
Gesamte Fahrt	0,3	0,5	0,2	0,9	0,5	0,4	0,0	0,6	0,0	-0,4	0,6	-0,1	-0,1	-0,5	-0,3	-0,3	

5. Perzentil in Ost für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	5. Perzentil der Ortsabweichung in Ost in m																
Großstadt mit Begrünung	-7,7	-5,5	-3,6	-2,7	-1,3	-2,2	-0,7	-2,2	-0,6	-0,9	-3,5	-1,1	-4,2	-2,0	-10,1	-0,4	-3,1
Großstadt wenig Begründung	-1,4	-6,8	-1,6	-1,9	-1,6	-8,5	-0,5	-3,0	-0,4	-19,7	-1,7	-1,0	-3,7	-1,4	-1,3	-2,8	-3,6
Großstadt keine Begrünung	-3,8	-4,1	-2,9	-4,2	-1,0	-4,3	-0,3	0,0	-0,7	-2,1	-1,0	-2,0	-2,5	-2,0	-3,4	-3,0	-2,3
Große Steinbrücken	-0,3	-5,4	-1,3	-5,2	-3,0	-9,1	-4,5	-0,8	-5,4	-5,4	-3,4	-6,0	-2,0	-2,2	-1,7	-1,7	-3,6
Enge Eisenbrücken	-8,1	-58,1	-19,3	-9,3	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	-15,8	-31,6	NaN	-19,0	NaN	NaN	NaN	-23,0
Offene Autobahndurchfahrt	-18,0	-12,0	0,3	0,7	1,1	1,8	-0,2	-1,6	0,6	-0,1	-2,1	-2,9	-1,4	-0,4	1,0	-0,2	-2,1
Offene Autobahndurchfahrt 2	1,9	-22,1	-0,7	2,1	3,6	-3,5	1,3	3,7	-31,0	-9,9	-1,6	2,0	-1,3	0,4	0,3	-18,1	-4,6
Überlandfahrt	-0,7	-1,5	-0,8	-1,1	-0,7	-1,1	-1,0	-0,7	-0,5	-1,1	-0,9	-0,9	-2,7	-2,6	-0,8	-1,6	-1,2
Waldfahrt	-0,4	-0,6	-1,8	-5,2	-0,9	-1,4	-4,4	-0,3	-0,9	-2,2	-2,6	-0,7	-3,8	-2,7	-0,7	NaN	-1,9
Autobahnfahrt	NaN	-0,3	0,0	-1,1	-0,9	-0,7	-0,8	-0,4	-1,2	-0,6	-0,8	-2,3	-1,0	-0,6	-0,4	NaN	-0,8
Stadtfahrt 1	-1,3	-0,2	-1,5	-1,8	-0,9	-0,4	-0,2	-3,0	-0,1	-1,9	-3,0	-0,7	-0,5	-1,1	-0,6	-0,6	-1,1
Stadtfahrt 2	-1,3	-1,7	-1,0	-1,1	-1,0	-5,0	-0,5	-0,7	-1,0	-1,1	-1,2	-2,0	-0,7	-2,0	-1,6	-1,0	-1,4
Überlandfahrt 2	NaN	-0,3	-0,8	-1,3	-1,6	-1,3	-0,5	0,1	-1,4	-1,3	-0,3	-3,4	-1,7	-1,4	-0,8	NaN	-1,2
Gesamte Fahrt	-2,8	-2,5	-1,4	-2,2	-1,5	-2,3	-1,0	-1,6	-1,2	-3,4	-1,3	-2,4	-2,6	-2,3	-1,9	-1,9	

95. Perzentil in Ost für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	95. Perzentil der Ortsabweichung in Ost in m																
Großstadt mit Begrünung	3,7	11,3	10,7	10,2	53,9	8,0	3,4	3,5	2,7	6,0	11,0	3,8	8,9	4,9	2,5	4,2	9,3
Großstadt wenig Begründung	1,4	6,6	1,8	1,9	0,6	4,3	0,7	1,1	2,6	0,8	2,2	1,4	5,3	0,6	1,1	0,6	2,1
Großstadt keine Begrünung	1,0	5,3	3,1	2,9	2,4	6,9	0,8	2,4	2,2	3,2	4,2	1,5	5,0	1,4	0,8	1,6	2,8
Große Steinbrücken	8,7	1,3	2,8	2,9	1,8	3,3	1,8	3,7	3,8	1,4	0,5	0,4	7,0	7,9	0,8	4,3	3,3
Enge Eisenbrücken	-6,0	-25,2	-8,1	-0,7	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	-9,4	-12,5	NaN	-0,7	NaN	NaN	NaN	-9,0
Offene Autobahndurchfahrt	5,2	0,2	14,5	11,0	16,0	16,2	8,0	14,3	5,7	3,9	20,1	9,5	1,4	10,8	17,8	4,4	10,0
Offene Autobahndurchfahrt 2	38,9	7,7	74,8	10,2	53,2	14,8	8,5	52,1	24,3	1,2	86,8	59,7	48,0	25,9	10,4	10,2	32,9
Überlandfahrt	1,1	0,1	0,0	0,3	0,6	0,1	0,3	1,0	0,2	0,1	0,2	0,7	-1,0	-1,2	0,4	-0,1	0,2
Waldfahrt	7,7	11,4	0,8	43,3	5,9	9,8	3,2	4,3	2,5	13,9	1,8	4,3	5,3	0,8	2,7	NaN	7,8
Autobahnfahrt	NaN	0,6	0,7	-0,4	0,2	0,4	-0,1	0,3	-0,2	-0,3	0,8	-0,3	-0,4	-0,1	0,2	NaN	0,1
Stadtfahrt 1	0,7	1,3	0,2	0,4	0,2	3,5	0,8	-0,1	2,1	-0,2	0,3	0,1	0,1	1,2	0,1	2,2	0,8
Stadtfahrt 2	1,5	0,5	0,0	0,8	0,8	0,3	0,6	1,4	4,1	-0,1	0,4	-0,3	0,5	-1,3	-0,3	0,5	0,6
Überlandfahrt 2	NaN	2,9	0,8	0,8	0,6	1,4	0,6	1,3	-0,4	0,1	0,5	2,0	1,4	0,8	1,0	NaN	1,0
Gesamte Fahrt	3,7	5,6	1,7	8,7	3,2	5,3	1,9	3,2	2,2	3,6	3,0	2,3	4,0	1,3	1,3	1,9	

Quer- und Längsortspräzision

Mittlere Ortspräzision quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	Mittlere Ortspräzision in Quer zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	-2,2	-1,3	-2,6	-0,8	-2,6	-0,5	-0,1	-0,7	0,1	-0,4	-2,0	-1,2	-2,5	-2,5	-1,4	0,1	-1,3
Großstadt wenig Begründung	0,6	-2,0	0,3	-0,1	-0,3	0,6	0,0	-0,5	-0,1	-0,3	0,4	0,1	1,9	-0,1	0,0	-0,4	0,0
Großstadt keine Begrünung	-5,3	-2,1	0,9	-0,9	-1,5	-3,1	-0,7	-0,4	-0,7	-0,6	-1,4	-0,4	-0,7	-0,3	-0,7	-0,2	-1,1
Große Steinbrücken	1,5	1,9	0,4	1,1	0,8	0,8	0,0	0,7	-0,1	1,0	0,3	1,0	0,5	0,2	1,0	1,3	0,8
Enge Eisenbrücken	35,5	91,5	39,6	45,4	16,6	23,7	65,1	26,9	22,2	26,9	53,2	37,6	18,7	29,0	27,8	-27,8	-36,7
Offene Autobahndurchfahrt	6,1	1,4	0,4	0,4	-1,8	1,7	0,8	1,4	1,3	1,8	1,4	0,8	0,6	0,6	0,9	-1,7	1,0
Offene Autobahndurchfahrt 2	2,0	1,1	33,0	-6,1	20,7	-4,9	-2,7	26,3	6,1	6,5	42,4	25,9	30,0	-9,7	-3,7	-7,7	-12,3
Überlandfahrt	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Waldfahrt	-1,5	-0,1	-0,2	-1,1	-1,9	0,1	0,2	-0,4	0,0	-1,7	0,0	1,0	-0,2	0,0	-0,1	NaN	-0,4
Autobahnfahrt	NaN	-0,4	0,0	-0,7	-0,2	-0,6	-0,2	-0,3	-0,7	-0,3	-0,2	-0,9	-0,8	-0,3	-0,4	NaN	-0,4
Stadtfahrt 1	-1,6	-1,2	-1,0	-0,6	-0,3	-0,8	-0,3	-1,3	0,0	-0,3	-0,5	-0,5	-0,9	-0,9	0,5	0,0	-0,6
Stadtfahrt 2	0,2	-0,3	-0,2	0,2	-0,1	-0,3	0,4	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,4	-0,2	0,1	0,0	0,1	0,0
Überlandfahrt 2	NaN	-0,8	-0,1	-0,1	-0,4	0,0	0,5	-0,1	0,0	0,0	0,2	-0,5	0,0	0,1	0,0	NaN	-0,1
Gesamte Fahrt	-1,0	-0,8	-0,4	-0,4	-0,8	-0,3	0,0	-0,4	-0,1	-0,3	-0,6	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	

5. Perzentil quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	5. Perzentil der Ortsabweichung in Quer zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	19,4	9,2	18,4	7,5	27,3	7,8	7,4	5,9	2,8	3,8	15,8	4,0	13,0	12,9	17,1	3,4	-11,0
Großstadt wenig Begründung	-5,6	-7,0	-2,3	-2,8	-2,5	-3,6	-2,7	-2,9	-2,1	-7,5	-2,6	-1,1	-1,0	-2,2	-1,1	-2,5	-3,1
Großstadt keine Begrünung	-27,2	-7,7	-2,9	-6,5	-6,3	11,5	-3,5	-2,4	-2,2	-2,4	-10,5	-2,0	-5,0	-3,6	-3,9	-4,0	-6,3
Große Steinbrücken	-4,4	-4,9	-1,7	-5,4	-3,1	-6,0	-8,4	-1,9	-6,3	-6,6	-2,9	-5,0	-4,4	-3,6	-1,9	-3,7	-4,4
Enge Eisenbrücken	40,0	118,0	61,1	50,0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	33,6	70,1	NaN	38,1	NaN	NaN	NaN	-58,7
Offene Autobahndurchfahrt	76,4	12,2	19,3	4,6	43,0	8,5	17,1	5,0	14,3	1,5	16,2	9,3	4,4	21,2	17,0	4,3	-17,1
Offene Autobahndurchfahrt 2	41,1	35,8	73,1	13,8	58,6	15,8	10,5	54,5	14,7	2,7	70,9	80,5	43,4	30,4	10,9	22,9	-36,2
Überlandfahrt	-0,9	-1,5	-1,7	-0,9	-1,9	-1,0	-1,9	-1,5	-1,4	-1,0	-1,6	-1,7	-2,4	-1,8	-0,9	-1,5	-1,5
Waldfahrt	-16,6	-12,2	-6,2	-42,4	-21,3	-9,8	-4,3	-4,0	-3,7	-14,6	-4,7	-6,9	-7,8	-3,1	-2,8	NaN	-10,7
Autobahnfahrt	NaN	-1,7	-1,1	-1,1	-1,3	-2,3	-0,6	-0,9	-1,8	-0,6	-1,8	-4,5	-2,2	-0,9	-1,0	NaN	-1,6
Stadtfahrt 1	-4,9	-2,3	-2,8	-1,9	-1,1	-1,9	-0,6	-4,3	-0,5	-1,3	-5,2	-0,9	-1,8	-1,8	-1,4	-1,0	-2,1
Stadtfahrt 2	-4,9	-2,0	-1,3	-0,9	-1,0	-2,4	-1,3	-1,0	-3,8	-1,2	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,2	-0,8	-1,8
Überlandfahrt 2	NaN	-5,4	-1,6	-1,0	-2,1	-1,5	-1,0	-1,7	-1,3	-1,2	-1,4	-4,9	-1,7	-1,3	-1,1	NaN	-1,9
Gesamte Fahrt	-14,3	-6,5	-2,7	-6,2	-6,0	-5,3	-2,9	-3,1	-2,0	-3,8	-4,7	-3,8	-4,0	-3,3	-1,9	-2,5	

95. Perzentil quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	95. Perzentil der Ortsabweichung in Quer zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	7,0	7,2	3,8	3,6	2,8	5,0	8,8	4,2	3,0	3,0	12,6	2,4	5,9	5,4	1,8	3,1	5,0
Großstadt wenig Begründung	7,1	5,4	2,0	1,8	0,9	9,6	2,3	3,0	2,3	8,0	2,6	1,3	9,4	3,5	1,4	1,3	3,9
Großstadt keine Begrünung	12,6	2,8	4,6	2,6	1,4	3,2	2,1	1,2	1,6	1,3	4,2	1,4	4,5	2,9	2,6	2,6	3,2
Große Steinbrücken	15,1	17,3	4,7	10,6	7,8	8,1	6,6	4,4	4,6	8,2	5,3	9,4	6,3	6,5	7,4	12,8	8,4
Enge Eisenbrücken	-34,4	-69,1	-22,9	-38,6	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	-23,9	-44,3	NaN	2,0	NaN	NaN	NaN	-33,0
Offene Autobahndurchfahrt	66,5	23,0	15,4	9,7	27,0	18,3	10,0	14,3	11,8	5,4	19,3	10,3	5,8	15,1	14,5	2,0	16,8
Offene Autobahndurchfahrt 2	66,2	38,0	1,5	-0,4	5,7	0,9	5,3	-1,5	35,8	19,9	4,5	33,6	0,4	7,2	0,6	0,8	13,7
Überlandfahrt	1,2	1,4	1,4	1,0	1,8	1,2	2,1	1,0	1,5	1,1	1,5	1,4	2,4	2,8	0,9	2,7	1,6
Waldfahrt	12,0	12,1	5,2	31,4	10,4	13,0	6,2	3,5	2,4	5,4	3,9	8,3	6,9	3,0	2,8	NaN	8,4
Autobahnfahrt	NaN	1,4	1,1	0,2	1,0	1,9	0,2	0,8	0,8	0,2	2,1	2,2	1,1	0,7	0,6	NaN	1,0
Stadtfahrt 1	1,2	0,7	1,1	0,6	0,4	1,4	0,6	0,1	0,6	0,4	3,6	0,7	0,8	1,0	1,8	1,2	1,0
Stadtfahrt 2	3,4	1,4	0,7	0,9	0,9	1,3	2,8	0,9	2,2	1,3	1,3	1,7	1,2	2,4	1,7	1,0	1,6
Überlandfahrt 2	NaN	1,8	1,1	1,1	0,9	2,3	2,4	1,6	1,9	1,3	3,3	4,1	1,6	1,3	1,0	NaN	1,8
Gesamte Fahrt	7,5	4,8	2,2	3,9	2,9	3,8	3,1	2,2	2,2	2,7	3,5	2,8	3,3	2,7	1,8	2,5	

Mittlere Ortspräzision Längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	Mittlere Ortspräzision in Längs zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	-0,1	0,3	-0,7	-0,6	3,5	0,2	-0,2	-0,3	0,4	0,3	-1,6	0,3	3,6	0,2	0,9	0,5	0,4
Großstadt wenig Begründung	0,3	-1,0	0,1	-0,1	-0,1	0,9	0,1	-0,1	-0,6	2,8	0,4	0,1	0,7	0,4	0,2	0,5	0,3
Großstadt keine Begrünung	-5,8	-1,7	0,3	0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,4	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,8	-0,3	0,1	-1,0	-0,6
Große Steinbrücken	-1,3	-0,4	-0,1	-0,8	-0,5	-1,6	-0,9	0,2	-0,4	-1,3	-0,5	0,2	-2,4	0,1	-0,5	-1,2	-0,7
Enge Eisenbrücken	38,4	85,0	72,9	95,1	39,8	41,6	115,9	48,1	38,6	41,3	89,3	32,3	58,2	42,6	44,3	43,4	57,9
Offene Autobahndurchfahrt	-8,7	-0,9	1,1	2,0	-0,7	3,4	1,1	1,6	1,2	0,0	2,8	2,2	-0,1	1,0	1,3	-0,4	0,4
Offene Autobahndurchfahrt 2	-40,8	24,2	1,1	-5,0	10,5	15,0	-5,5	-10,0	-5,2	10,1	14,5	-50,1	7,0	-6,6	0,9	8,1	-2,0
Überlandfahrt	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	0,0	-0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0
Waldfahrt	0,5	0,4	-0,4	-4,3	0,2	0,7	-0,5	-0,2	-0,4	-0,5	-0,3	-0,1	-1,0	-0,2	-0,1	NaN	-0,4
Autobahnfahrt	NaN	0,7	0,5	-0,2	0,2	0,9	0,0	0,3	0,4	0,0	0,6	0,8	0,5	0,3	0,3	NaN	0,4
Stadtfahrt 1	-0,6	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4	0,7	0,1	-0,8	0,7	-0,7	-0,7	-0,2	0,0	-0,2	-0,3	0,7	-0,2
Stadtfahrt 2	1,2	0,3	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	-0,1	0,1	-0,1	0,9	0,0	0,1
Überlandfahrt 2	NaN	0,3	0,0	0,0	0,2	0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	0,3	0,2	0,2	NaN	0,0
Gesamte Fahrt	-1,0	0,4	0,2	-0,5	0,4	0,5	0,0	-0,1	0,1	0,3	0,1	-0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	

5. Perzentil in Längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	5. Perzentil der Ortsabweichung in Längs zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	-11,6	-9,4	-9,3	-7,8	-3,5	-7,6	-5,3	-4,3	-2,3	-3,7	-10,5	-2,1	-4,3	-6,0	-2,5	-2,3	-5,8
Großstadt wenig Begründung	-6,8	-8,7	-2,6	-1,6	-1,1	-2,9	-1,7	-2,6	-2,8	-1,9	-2,5	-1,2	-2,3	-1,9	-1,4	-1,0	-2,7
Großstadt keine Begrünung	-23,1	-8,8	-3,1	-3,5	-1,9	-5,0	-1,4	-1,6	-2,1	-2,1	-4,5	-1,9	-5,3	-2,3	-3,0	-3,5	-4,6
Große Steinbrücken	-12,4	-13,9	-4,3	-9,3	-7,0	-19,4	-8,2	-3,3	-4,1	-13,3	-8,2	-4,8	-17,5	-3,9	-5,1	-19,5	-9,6
Enge Eisenbrücken	37,1	67,6	41,4	72,4	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	39,6	74,9	NaN	-1,2	NaN	NaN	NaN	47,4
Offene Autobahndurchfahrt	-71,7	-22,8	-14,4	-3,4	-38,7	-6,0	-12,7	-5,8	-9,1	-4,6	-9,3	-4,2	-5,0	-18,3	-12,3	-4,0	-15,1
Offene Autobahndurchfahrt 2	-81,1	-7,1	-30,7	-9,5	-25,1	-1,7	-11,5	-37,5	-25,5	-1,3	-38,3	-102,8	-9,7	-12,6	-5,9	-14,0	-25,9
Überlandfahrt	-1,2	-1,7	-1,5	-1,0	-1,6	-1,1	-2,1	-0,9	-1,4	-1,1	-1,3	-1,3	-2,5	-2,5	-0,8	-1,5	-1,5
Waldfahrt	-15,9	-13,9	-6,7	-38,3	-18,1	-8,5	-5,0	-4,7	-3,4	-13,1	-5,5	-14,9	-9,6	-3,4	-4,5	NaN	-11,0
Autobahnfahrt	NaN	-0,3	-0,4	-0,8	-0,8	-0,2	-0,7	-0,4	-1,0	-0,5	-0,8	-2,0	-0,9	-0,3	-0,3	NaN	-0,7
Stadtfahrt 1	-2,4	-1,1	-1,6	-1,8	-0,9	-1,0	-0,4	-3,0	-0,5	-2,5	-3,2	-0,7	-0,7	-1,7	-1,1	-0,2	-1,4
Stadtfahrt 2	-2,0	-2,2	-1,7	-0,8	-1,1	-2,9	-1,7	-0,9	-1,8	-0,9	-1,1	-1,7	-1,3	-2,1	-1,3	-0,8	-1,5
Überlandfahrt 2	NaN	-2,6	-1,7	-1,2	-1,4	-1,3	-1,2	-1,5	-1,3	-0,9	-1,8	-3,2	-1,3	-1,0	-0,8	NaN	-1,5
Gesamte Fahrt	-13,0	-5,7	-2,1	-6,5	-2,9	-3,9	-2,8	-2,8	-1,9	-2,9	-3,5	-2,5	-3,1	-2,6	-1,8	-2,1	

95. Perzentil in Längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Vergleichsfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Prüffahrten																
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Mittel
	95. Perzentil der Ortsabweichung in Längs zur Fahrtrichtung in m																
Großstadt mit Begrünung	11,1	7,9	7,1	7,9	57,2	7,5	5,2	3,9	3,7	4,3	4,9	3,8	13,0	7,2	8,2	3,5	9,8
Großstadt wenig Begründung	6,5	5,0	2,6	1,2	1,0	4,8	1,5	1,7	1,3	18,2	2,7	1,4	2,7	5,8	1,6	2,1	3,8
Großstadt keine Begrünung	6,4	4,5	3,2	3,0	1,7	5,4	1,7	2,4	2,0	2,8	4,0	1,4	2,4	1,7	2,8	1,9	3,0
Große Steinbrücken	4,6	9,8	2,3	5,6	4,1	5,2	6,3	4,3	5,5	5,2	3,6	6,2	4,5	3,4	2,0	7,0	5,0
Enge Eisenbrücken	41,1	96,8	107,8	109,8	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	43,0	101,0	NaN	129,2	NaN	NaN	NaN	89,8
Offene Autobahndurchfahrt	63,1	15,7	23,5	11,1	48,8	20,1	19,2	9,8	17,2	3,6	20,7	13,5	3,1	22,8	22,0	3,7	19,9
Offene Autobahndurchfahrt 2	-2,1	54,5	34,9	-1,1	64,9	23,7	-0,7	13,0	12,5	20,4	66,6	-1,1	27,1	0,7	10,9	30,6	22,2
Überlandfahrt	1,3	1,1	1,7	1,1	1,8	1,1	1,7	1,0	1,4	1,1	1,4	1,1	2,5	2,1	1,1	1,3	1,4
Waldfahrt	15,9	16,5	3,2	15,1	21,0	17,7	3,2	3,6	2,2	10,1	3,6	10,2	4,8	3,2	3,1	NaN	8,9
Autobahnfahrt	NaN	1,4	0,9	0,9	1,0	1,7	0,6	0,8	1,3	0,7	1,9	3,3	1,4	0,8	0,7	NaN	1,2
Stadtfahrt 1	1,3	0,6	1,7	1,8	0,2	3,4	0,8	0,6	2,1	0,4	1,2	0,5	1,9	1,2	0,1	2,3	1,3
Stadtfahrt 2	6,4	2,7	1,1	0,8	1,0	1,8	2,7	1,4	2,1	1,3	0,7	1,5	1,4	1,9	1,6	0,9	1,8
Überlandfahrt 2	NaN	3,5	1,7	1,2	1,5	1,6	1,5	1,5	1,1	1,0	2,0	2,4	2,2	1,2	1,0	NaN	1,7
Gesamte Fahrt	7,1	6,2	2,1	3,1	3,6	5,8	2,6	2,3	1,9	4,3	2,5	3,1	3,7	2,3	2,1	2,3	

Anhang 2 – Ortsabweichungen der Wiederholfahrten

Quer- und Längsortspräzision

Mittlere Ortspräzision quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	-2,5	-2,2	-1,6	-2,3	-2,2	-2,6	-3,4	-3,3	-1,6	-1,9	-1,7	-2,3
Großstadt wenig Begrünung	1,9	1,9	1,6	1,6	1,9	1,8	1,6	1,5	1,5	1,7	1,8	1,7
Großstadt keine Begrünung	-0,7	-1,5	-0,8	-0,5	-1,5	-0,9	-0,8	-0,9	-1,1	-0,9	-1,1	-1,0
Große Steinbrücken	0,5	1,2	-0,1	0,7	1,2	0,4	0,7	1,0	1,1	1,3	1,2	0,8
Enge Eisenbrücken	-18,7	-12,9	-20,2	-12,8	-12,9	-12,5	-11,2	-18,2	-26,7	-10,6	-11,6	-15,3
Offene Autobahndurchfahrt	0,6	-1,1	-0,3	0,5	-1,1	-0,9	1,3	-1,9	-1,2	-0,2	0,1	-0,4
Offene Autobahndurchfahrt 2	-30,0	-31,4	-61,0	-23,6	-31,4	-24,1	-34,7	-30,7	-26,9	-33,5	-29,7	-32,4
Überlandfahrt	-0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1
Waldfahrt	-0,2	0,0	0,1	-0,1	0,0	-0,1	-0,3	0,1	0,0	0,2	-0,1	0,0
Autobahnfahrt	-0,8	-0,2	-0,3	-0,4	-0,2	-0,4	-0,7	-0,4	-0,4	-0,6	-0,4	-0,4
Stadtfahrt 1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,7	-0,6	-1,3	-1,1	-0,5	-0,8	-0,5	-0,7
Stadtfahrt 2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3
Überlandfahrt 2	0,0	0,2	0,0	-0,2	0,2	0,0	-0,3	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Gesamte Fahrt	-0,4	-0,3	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,6	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	

5. Perzentil quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	-13,0	-9,8	-7,3	-12,3	-9,8	-13,1	-15,7	-16,5	-8,8	-11,3	-8,3	-11,4
Großstadt wenig Begrünung	-1,0	-3,5	-1,5	-1,6	-3,5	-1,0	-1,4	-4,8	-1,3	-2,3	-1,6	-2,1
Großstadt keine Begrünung	-5,0	-7,0	-4,7	-4,5	-7,0	-5,7	-5,2	-5,4	-6,6	-5,4	-5,5	-5,6
Große Steinbrücken	-4,4	-3,1	-5,6	-2,8	-3,1	-3,9	-3,6	-4,7	-5,2	-4,1	-3,1	-3,9
Enge Eisenbrücken	-38,1	-23,1	-39,0	-22,1	-23,1	-21,9	-20,0	-43,0	-46,9	-20,8	-22,7	-29,2
Offene Autobahndurchfahrt	-4,4	-12,8	-19,5	-12,7	-12,8	-15,8	-8,9	-16,4	-15,4	-5,2	-5,8	-11,8
Offene Autobahndurchfahrt 2	-43,4	-59,4	-135,0	-51,1	-59,4	-38,4	-56,9	-55,3	-49,6	-52,8	-53,8	-59,5
Überlandfahrt	-2,4	-2,3	-2,1	-1,5	-2,3	-1,5	-2,4	-2,5	-1,9	-1,5	-2,4	-2,1
Waldfahrt	-7,8	-8,2	-6,3	-6,2	-8,2	-6,6	-7,2	-5,1	-6,0	-5,2	-5,1	-6,5
Autobahnfahrt	-2,2	-1,4	-1,4	-1,6	-1,4	-1,7	-2,8	-1,6	-1,6	-2,7	-1,8	-1,8
Stadtfahrt 1	-1,8	-1,8	-1,4	-1,2	-1,8	-1,4	-2,2	-3,1	-1,5	-1,6	-1,6	-1,8
Stadtfahrt 2	-1,2	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,8	-1,9	-1,6	-1,3	-1,8	-1,5
Überlandfahrt 2	-1,7	-1,2	-1,3	-2,5	-1,2	-1,1	-1,9	-2,2	-2,4	-1,1	-1,1	-1,6
Gesamte Fahrt	-4,1	-4,2	-3,9	-3,6	-4,2	-4,0	-5,0	-4,6	-3,8	-3,7	-3,6	

95. Perzentil quer zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	5,9	3,7	4,9	4,7	3,7	5,0	6,6	4,8	6,0	4,9	5,9	5,1
Großstadt wenig Begründung	9,4	13,3	8,4	8,7	13,3	8,6	9,5	11,2	6,4	9,7	10,4	9,9
Großstadt keine Begrünung	4,5	4,5	4,2	5,2	4,5	3,4	3,3	4,4	3,7	4,3	4,5	4,2
Große Steinbrücken	6,3	8,4	5,1	4,2	8,4	5,9	6,9	8,0	8,1	9,2	7,3	7,1
Enge Eisenbrücken	2,0	0,6	1,1	1,0	0,6	1,0	1,7	1,5	1,8	1,0	3,3	1,4
Offene Autobahndurchfahrt	5,8	7,2	15,9	9,2	7,2	5,7	7,4	7,5	8,4	10,8	5,0	8,2
Offene Autobahndurchfahrt 2	0,4	0,8	3,5	4,4	0,8	1,1	1,9	1,4	1,2	1,1	1,9	1,7
Überlandfahrt	2,4	2,8	3,4	1,6	2,8	1,7	2,8	3,3	2,4	1,7	2,8	2,5
Waldfahrt	6,9	6,5	7,2	6,2	6,5	5,6	6,2	5,6	6,0	5,6	6,1	6,2
Autobahnfahrt	1,1	1,0	0,9	0,9	1,0	1,1	1,9	0,6	0,9	0,9	1,3	1,0
Stadtfahrt 1	0,8	0,7	0,6	1,0	0,7	0,7	0,0	0,8	0,7	0,6	0,9	0,7
Stadtfahrt 2	1,2	1,5	1,6	1,2	1,5	1,1	2,1	1,9	1,6	1,3	1,7	1,5
Überlandfahrt 2	1,6	1,2	1,5	1,6	1,2	1,3	2,1	2,0	1,5	1,2	1,4	1,5
Gesamte Fahrt	3,4	4,0	3,9	3,4	4,0	3,2	4,2	3,8	3,4	3,2	3,7	

Mittlere Ortspräzision längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	3,6	3,0	3,0	3,6	3,0	3,0	4,6	3,1	2,9	2,9	2,5	3,2
Großstadt wenig Begründung	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	0,6	0,9	0,8	0,7	0,7
Großstadt keine Begrünung	-0,8	-0,4	-0,7	-0,8	-0,4	-0,6	-1,1	-0,9	-0,5	-0,5	-0,4	-0,6
Große Steinbrücken	-2,4	-0,2	-1,9	-0,2	-0,2	-0,9	-1,9	-1,2	-1,7	-0,3	-0,9	-1,1
Enge Eisenbrücken	58,2	34,4	57,6	36,8	34,4	36,4	38,2	53,2	69,5	30,2	43,3	44,7
Offene Autobahndurchfahrt	-0,1	1,4	1,8	0,4	1,4	2,5	0,1	1,3	1,6	3,5	2,8	1,5
Offene Autobahndurchfahrt 2	7,0	12,9	15,9	9,6	12,9	4,9	19,6	12,8	-6,0	14,7	7,0	10,1
Überlandfahrt	-0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Waldfahrt	-1,0	-1,2	-1,1	-1,1	-1,2	-0,9	-1,4	-0,8	-1,2	-1,1	-1,0	-1,1
Autobahnfahrt	0,5	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
Stadtfahrt 1	0,0	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,5	-0,4
Stadtfahrt 2	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Überlandfahrt 2	0,3	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,0	0,2	-0,1	0,2	0,2	0,2
Gesamte Fahrt	0,3	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	

5. Perzentil längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	-4,3	-4,0	-4,2	-4,3	-4,0	-5,0	-5,3	-6,3	-4,1	-5,0	-4,8	-4,7
Großstadt wenig Begründung	-2,3	-2,8	-2,3	-2,5	-2,8	-2,2	-2,0	-4,9	-2,1	-2,6	-2,3	-2,6
Großstadt keine Begrünung	-5,3	-5,0	-4,1	-4,2	-5,0	-3,6	-3,6	-4,2	-3,6	-4,0	-4,3	-4,3
Große Steinbrücken	-17,5	-4,2	-15,7	-4,3	-4,2	-10,6	-12,8	-9,1	-15,5	-6,3	-10,0	-10,0
Enge Eisenbrücken	-1,2	-0,3	0,2	0,2	-0,3	0,2	0,0	-0,4	0,3	-8,8	0,0	-0,9
Offene Autobahndurchfahrt	-5,0	-6,1	-19,5	-11,1	-6,1	-6,2	-10,7	-14,8	-12,8	-0,9	-2,2	-8,7
Offene Autobahndurchfahrt 2	-9,7	-14,0	-35,5	-23,0	-14,0	-16,0	-22,8	-17,9	-21,7	-18,0	-31,8	-20,4
Überlandfahrt	-2,5	-2,7	-3,2	-1,6	-2,7	-1,6	-2,7	-3,2	-2,2	-1,6	-2,8	-2,4
Waldfahrt	-9,6	-9,9	-10,0	-10,0	-9,9	-9,2	-11,0	-9,8	-10,6	-9,1	-9,4	-9,9
Autobahnfahrt	-0,9	0,1	-0,4	-0,5	0,1	-0,5	-1,1	-1,9	-0,5	-0,8	-0,7	-0,6
Stadtfahrt 1	-0,7	-1,4	-1,4	-1,5	-1,4	-1,7	-1,5	-1,3	-1,5	-1,3	-1,7	-1,4
Stadtfahrt 2	-1,3	-1,6	-1,7	-1,6	-1,6	-1,7	-2,0	-2,1	-1,8	-1,7	-1,9	-1,7
Überlandfahrt 2	-1,3	-1,2	-1,3	-1,3	-1,2	-1,1	-2,1	-1,7	-2,5	-1,1	-1,3	-1,5
Gesamte Fahrt	-3,2	-3,5	-3,4	-2,9	-3,5	-2,8	-3,6	-3,9	-3,1	-2,8	-3,3	

95. Perzentil der Ortspräzision längs zur Fahrtrichtung für die einzelnen Prüffälle der einzelnen Wiederholfahrten (NaN-Werte beruhen auf Messfehlern oder einer nicht ausreichenden Anzahl von Messwerten für den Prüffall)

	Wiederholfahrten											
Prüffälle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mittel
Großstadt mit Begrünung	13,0	15,0	15,2	16,1	15,0	14,2	17,2	12,9	14,3	18,2	13,2	14,9
Großstadt wenig Begründung	2,7	3,8	3,0	3,2	3,8	3,1	4,1	4,2	3,1	3,6	3,4	3,5
Großstadt keine Begrünung	2,4	4,1	1,9	2,2	4,1	2,2	1,7	2,7	2,9	2,5	3,4	2,8
Große Steinbrücken	4,5	4,6	3,5	3,1	4,6	5,2	3,5	4,9	8,7	4,9	4,7	4,7
Enge Eisenbrücken	129,2	61,7	139,3	71,5	61,7	71,5	69,4	131,1	158,8	63,9	86,8	95,0
Offene Autobahndurchfahrt	3,1	14,7	29,1	11,7	14,7	15,8	6,8	18,4	19,9	12,5	6,3	13,9
Offene Autobahndurchfahrt 2	27,1	50,5	70,0	53,8	50,5	23,4	87,5	45,0	9,4	44,6	61,9	47,6
Überlandfahrt	2,5	2,8	2,8	2,0	2,8	1,8	2,9	3,1	2,3	1,8	2,8	2,5
Waldfahrt	4,8	4,4	5,2	4,2	4,4	4,5	4,7	3,9	4,3	3,9	4,0	4,4
Autobahnfahrt	1,4	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	2,1	1,8	1,6	1,5	1,5	1,5
Stadtfahrt 1	1,9	1,5	1,6	1,4	1,5	1,4	1,9	1,9	1,6	1,6	1,8	1,6
Stadtfahrt 2	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8	1,6	1,4	1,6	1,6
Überlandfahrt 2	2,2	1,6	2,0	2,1	1,6	1,8	1,6	2,4	2,0	1,6	1,6	1,9
Gesamte Fahrt	3,8	4,2	3,9	3,9	4,2	3,9	4,6	4,2	3,6	3,4	3,6	